

タンデム型誤り検出自動再送要求方式の
性能評価に関する研究

2000年3月

杉町 信行

タンデム型誤り検出自動再送要求方式の 性能評価に関する研究

内容要約

第1章 序 論

第2章 タンデム型 Stop-and-Wait 方式の性能評価に関する研究

2.1 概 説

2.2 タンデム型 Stop-and-Wait 方式の性能評価に関する研究

2.3 タンデム型 Stop-and-Wait 方式の性能評価に関する研究

2.4 タンデム型 Stop-and-Wait 方式の性能評価に関する研究

2.5 タンデム型 Stop-and-Wait 方式の性能評価に関する研究

2.6 タンデム型 Stop-and-Wait 方式の性能評価に関する研究

2.7 タンデム型 Stop-and-Wait 方式の性能評価に関する研究

2.8 タンデム型 Stop-and-Wait 方式の性能評価に関する研究

2.9 タンデム型 Stop-and-Wait 方式の性能評価に関する研究

2.10 タンデム型 Stop-and-Wait 方式の性能評価に関する研究

第3章 タンデム型 Stop-and-Wait 方式の性能評価に関する研究

3.1 概 説

3.2 タンデム型 Stop-and-Wait 方式の性能評価に関する研究

3.3 タンデム型 Stop-and-Wait 方式の性能評価に関する研究

3.4 タンデム型 Stop-and-Wait 方式の性能評価に関する研究

3.5 タンデム型 Stop-and-Wait 方式の性能評価に関する研究

3.6 タンデム型 Stop-and-Wait 方式の性能評価に関する研究

3.7 タンデム型 Stop-and-Wait 方式の性能評価に関する研究

3.8 タンデム型 Stop-and-Wait 方式の性能評価に関する研究

3.9 タンデム型 Stop-and-Wait 方式の性能評価に関する研究

3.10 タンデム型 Stop-and-Wait 方式の性能評価に関する研究

杉 町 信 行

目 次

内容梗概	iii
第 1 章 序 論	1
第 2 章 タンデム型 Stop-and-Wait A R Q 方式のスループット特性	5
2.1 序 言	5
2.2 標準型 Stop-and-Wait A R Q 方式	5
2.3 タンデム型 Stop-and-Wait A R Q 方式	7
2.3.1 伝送プロトコル (中継再送用バッファサイズ = 1 の場合)	7
2.3.2 スループット解析	8
2.4 バッファリング効果	9
2.4.1 伝送プロトコル (中継再送用バッファサイズ = $M \geq 2$ の場合)	10
2.4.2 スループット解析	11
2.5 スループット特性	17
2.6 結 言	21
第 3 章 タンデム型 Stop-and-Wait A R Q 方式の伝送遅延特性	23
3.1 序 言	23
3.2 標準型 Stop-and-Wait A R Q 方式の伝送遅延解析	23
3.3 タンデム型 Stop-and-Wait A R Q 方式の伝送遅延解析	25
3.4 タンデム型 Stop-and-Wait A R Q 方式の平均伝送遅延特性	27
3.5 結 言	34
第 4 章 タンデム型 Go-back-N A R Q 方式のスループット特性	36
4.1 序 言	36
4.2 標準型 Go-back-N A R Q 方式	37
4.2.1 伝送プロトコル	37

4.2.2 スループット解析	37
4.3 タンデム型 Go-back-N A R Q 方式	38
4.3.1 伝送プロトコル	38
4.3.2 スループット解析	39
4.4 スループット特性	45
4.5 結 言	48
第 5 章 タンデム型 Go-back-N A R Q 方式の伝送遅延特性	50
5.1 序 言	50
5.2 標準型 Go-back-N A R Q 方式の伝送遅延解析	50
5.3 タンデム型 Go-back-N A R Q 方式の伝送遅延解析	51
5.4 タンデム型 Go-back-N A R Q 方式の平均伝送遅延特性	53
5.5 結 言	58
第 6 章 ノード処理時間を考慮したタンデム型 Go-back-N A R Q 方式の トラヒック特性	60
6.1 序 言	60
6.2 標準型 Go-back-N A R Q 方式	61
6.2.1 伝送プロトコル	61
6.2.2 伝送遅延解析	62
6.2.3 スループット解析	63
6.3 タンデム型 Go-back-N A R Q 方式のトラヒック特性	63
6.3.1 伝送プロトコル	63
6.3.2 伝送遅延解析	64
6.3.3 スループット解析	67
6.4 標準型とタンデム型 Go-back-N A R Q 方式との比較	68
6.5 結 言	73
第 7 章 結 論	75
謝 辞	77
参考文献	78
発表論文リスト	83

内容梗概

コンピュータ通信の発達に伴い、デジタル情報を迅速かつ正確に伝送する誤り制御技術の重要性は増々高まっている。伝送回線には様々な要因により伝送誤りが発生することから、各種の誤り制御方式が研究されている。代表的な誤り制御方式には、誤り検出自動再送要求 (A R Q) 方式、誤り訂正 (F E C) 方式、ならびにそれらの特徴を生かしたハイブリッド方式がある。F E C 方式は、受信側が誤りを検出した場合、受信側でその誤りを訂正するのに対し、A R Q 方式は、送信側に再送を要求する方式である。

A R Q 方式は送信側からのパケットの送出方法により、基本的に Stop-and-Wait 方式、Go-back-N 方式、ならびに選択再送方式に分類できる。

本論文では、基本的な伝送プロトコルでありインプレメンテーションが容易である Stop-and-Wait 方式と中低速ネットワークにおいて広く用いられている Go-back-N 方式に関し、中継再送用バッファを有するタンデム型についてスループット特性と平均伝送遅延特性の観点より、その性能について論じる。

第1章は序論であり、本研究の背景について述べる。

第2章では、タンデム型 Stop-and-Wait A R Q 方式のスループット特性について述べる。まず、中継再送用バッファの無い標準型 Stop-and-Wait A R Q 方式のスループット特性についてまとめ、次いでタンデム型への拡張を行う。更に、中継再送用バッファを設けた場合のスループットを表す厳密式を導出する。その結果、バッファサイズが1個の場合はタンデム型と標準型の間には、パケット伝送成功確率に関してトレードオフが存在することを示す。また、バッファサイズが2個以上の場合には、その数を増やすほどスループット特性が改善されることを示す。最後に、スループットの改善率を定義し、バッファサイズとの関係について論ずる。

第3章では、タンデム型 Stop-and-Wait A R Q 方式の伝送遅延特性につ

いて、特に中継再送用バッファの効果という観点から考察する。まず、中継再送用バッファをもたない標準型 Stop-and-Wait 方式の伝送遅延特性についてまとめる。次いで、有限の中継再送用バッファを設けたタンデム型 Stop-and-Wait 方式について伝送遅延の母関数を導出し、それを用いてパケットの平均伝送遅延を求める。最後に平均伝送遅延に対するリンクの伝送成功確率やラウンドトリップ伝搬遅延、更に中継再送用バッファの影響について論じ、バッファ容量の設計指針を示す。

第4章では、タンデム型 Go-back-N A R Q 方式のスループット特性について考察する。まず、標準型の Go-back-N A R Q 方式について、その伝送プロトコルとスループット解析を概説する。次にこれをタンデム型に拡張した場合の伝送プロトコルを述べた後、そのスループットを厳密に解析する。最後にその解析結果を用いてスループット特性に対する中継再送用バッファの効果論じ、タンデム型は標準型に比べて常に優れた特性をもつことを示す。

第5章では、タンデム型 Go-back-N A R Q 方式の伝送遅延特性について考察する。まず、標準型 Go-back-N A R Q 方式の伝送遅延の導出手法について概説する。次にこれをタンデム型に適用し、その伝送遅延の母関数を導出する。これを用いてパケットの平均伝送遅延を求める。最後に、解析結果を用い、リンクの伝送成功確率が平均伝送遅延特性に与える影響などを論ずる。

第6章では、タンデム型 Go-back-N A R Q 方式において、ノード処理時間を考慮した場合のトラヒック特性について考察する。まず、ノード処理時間を考慮した標準型 Go-back-N A R Q 方式のスループットと伝送遅延の導出について概説する。次に、標準型の場合の導出手法を適用して、ノード処理時間を考慮したタンデム型の伝送遅延の母関数を導出し、スループットはこの母関数を用いて求める。最後にその解析結果を用いて、標準型とタンデム型のトラヒック特性を比較検討し、ノード処理時間の影響について論じる。

第7章は結論であり、本論文のまとめと今後の課題について述べる。

第 1 章 序 論

近年、コンピュータは、小型化、高性能化、マルチメディア化ならびにネットワーク化に向けて著しく発展し、コンピュータネットワークは高度情報社会の重要な基盤となっている。社会基盤としてのネットワークシステムには、使いやすさ、信頼性、どこでもサービスが受けられること、低コストなどが要求される[1]-[3]。

通信システムにおける性能は、システムが処理できる情報量を表わすスループットや情報が宛先に届くまでの遅延時間などが主要な指標として用いられる。例えば、データ通信においては伝送遅延はある程度許容される（1秒以内）が、ビット誤り率は 10^{-6} 以下が要求される。また、会話型音声通信では、短い遅延（250ms以下）が求められるが、誤り率に関しては非常に寛容（ 10^{-3} 以下）である[9],[10]。

コンピュータネットワークは、交換ノードにおける入力負荷がその処理能力を超え、輻輳が発生する場合がある。また、伝送回線には様々な要因によるノイズなどにより、情報の伝送途中に誤りが生じる。

以上の観点から、ネットワークリソースを有効に利用し、デジタル情報を迅速かつ正確に伝送するために、トラヒック制御が必要不可欠になる。そこで、前者に対しては輻輳を避けるためのフロー制御[1],[4]-[6]が、また後者に対しては通信の信頼性を高めるために各種の誤り制御方式が研究されている[7],[8]。

ポイントツーポイントのデータ通信システムにおいて、高信頼性伝送を実現するための技術として、3つの基本的なカテゴリーがある。一つはA R Q（automatic repeat request：誤り検出自動再送要求）方式であり、もう一つはF E C（forward error correction：誤り訂正）方式と呼ばれるものである。そして、A R QシステムとF E Cシステムを組合わせたハイブリッド方式[26]-[31]がある。

F E Cシステムは受信側で誤りを訂正するもので、チャネルの状態に依

存せず、符号レートで決まる一定のスループット効率を提供できる。しかし、このシステムでは復号化された情報は、誤りが正しく訂正されたかどうかに関わらず、ユーザに配送されるため、システムの信頼性はチャネルの悪化に伴って減少する。

一方、強力な誤り検出符号を有するARQシステムでは、チャネルの品質とは無関係に高い信頼性を提供することができる。しかし、スループットは再送を要求する回数に強く依存する。すなわち、チャネルの誤り率の増加に伴い、急激にスループットが低下する[7],[30]。

ARQ方式には送信側からのパケットの送出方法により、基本的にStop-and-Wait方式、Go-back-N方式、ならびにselective-repeat（選択再送）方式に分類できる。Stop-and-Wait ARQ方式[7],[11]-[13]では、送信端末はパケットの伝送後、受信端末からの確認信号を待つ次のパケットの伝送あるいは同じパケットの再送を行う。従って、このシステムは非常にシンプルではあるが、伝送したブロックに関する確認信号を待つ時間が無駄になるため、スループット効率が悪い。

連続型（Go-back-N）ARQ方式[1],[14]-[19]では、送信端末はパケットを伝送した後の確認信号を待つことなく、次々とパケットを伝送する。伝送したパケットの確認信号が再送を要求するものであった場合、送信端末はそのパケットが最初に伝送されてから再送を要求する確認信号を受信するまでに伝送したすべてのパケットを再送する。この方式は、パケットを連続的に伝送／再送するため、Stop-and-Wait ARQ方式と比べるとよりスループット効率が向上する。

選択再送方式[20]-[25]は、受信バッファを導入することによりスループット効率の向上を図るもので、Go-Back-N方式と同様に連続的にパケットを送出する。受信側から再送要求を受けた場合は、それに対応するパケットのみを再送する。この方式は、広範なビット誤り率において高いスループットを維持できる。しかし、受信側ではパケットのリアセンブリのため、理論的に無限大の容量のバッファが必要である。また、有限容量のバッファを持つ場合は、システムの性能を劣化させるバッファオーバーフローの問題が生じる。

これらの誤り検出自動再送要求方式のスループット性能や遅延性能は、パケット誤り率とラウンドトリップ伝搬遅延という2大因子に大きく影響を受け、これらの値が大きくなるとその性能は劣化する[32]。従って、これらの値をできるだけ小さくしなければならない。パケット誤り率を実質

的に小さくする効果を持たせるために、Bruneel and Moeneclay はパケットのコピーを複数個伝送する方式を提案し、そのスループット特性が向上することを示している[33]。また、林田、藤井、手塚はこの方式の遅延特性を解析し、平均伝送遅延が短くなることを示している[34]。一方、ラウンドトリップ伝搬遅延の因子に関しては、例えば衛星通信システムにおける衛星本体内処理 (onboard processing) の導入によりその短縮が図れること[35]、また地上回線においてはエンド・ツー・エンド A R Q 方式からリンク・バイ・リンク A R Q 方式とすることによりその短縮を図ることができるといわれている。衛星本体に処理機能を持たせることによりもたらされる効率改善については文献[35]にまとめられているが、Mase *et al.* はこれに Go-Back-N 方式を導入し、スループットに関する近似式とシミュレーションを示している[36]。

本論文では、衛星通信システム(図 1)において衛星本体にバッファリング機能、誤り検出機能、再送要求機能ならびに再送機能を持たせたタンデム型 A R Q 方式のトラヒック特性について、スループット特性と平均伝送遅延特性の観点より考察する。タンデム型 A R Q としては、基本的な伝送プロトコルでありインプレメンテーションが容易な Stop-and-Wait 方式と中低速ネットワークにおいて広く用いられている Go-back-N 方式をとりあげる。

第 2 章では、タンデム型 Stop-and-Wait A R Q 方式のスループット特性[37]について述べる。まず、中継再送用バッファの無い標準型 Stop-and-Wait A R Q 方式のスループット特性についてまとめ、次いでタンデム型への拡張を行う。更に、中継再送用バッファを設けた場合のスループットを表す厳密式を導出する。最後に、スループットの改善率を定義し、バッファサイズとの関係について論ずる。

第 3 章では、タンデム型 Stop-and-Wait A R Q 方式の伝送遅延特性[38]について、特に中継再送用バッファの効果という観点から考察する。まず、中継再送用バッファをもたない標準型 Stop-and-Wait 方式の伝送遅延特性についてまとめる。次いで、有限の中継再送用バッファを設けたタンデム型 Stop-and-Wait 方式について伝送遅延の母関数を導出し、それを用いてパケットの平均伝送遅延を求める。最後に平均伝送遅延に対するリンクの伝送成功確率やラウンドトリップ伝搬遅延、更に中継再送用バッファの影響について論じ、バッファ容量の設計指針を示す。

第 4 章では、タンデム型 Go-back-N A R Q 方式のスループット特性[39]

について考察する。まず、標準型の Go-back-N A R Q 方式について、その伝送プロトコルとスループット解析を概説する。次にこれをタンデム型に拡張した場合の伝送プロトコルを述べた後、そのスループットを厳密に解析し、中継再送用バッファの効果を論じる。

第5章では、タンデム型 Go-back-N A R Q 方式の伝送遅延特性[40]について考察する。まず、標準型 Go-back-N A R Q 方式の伝送遅延の導出手法について概説する。次にこれをタンデム型に適用し、その伝送遅延の母関数を導出する。これを用いてパケットの平均伝送遅延を求め、リンクの伝送成功確率が平均伝送遅延特性に与える影響などを論ずる。

第6章では、タンデム型 Go-back-N A R Q 方式において、ノード処理時間を考慮した場合のトラヒック特性[41]について考察する。まず、ノード処理時間を考慮した標準型 Go-back-N A R Q 方式のスループットと伝送遅延の導出について概説する。次に、標準型の場合の導出手法を適用して、ノード処理時間を考慮したタンデム型の伝送遅延の母関数を導出し、スループットはこの母関数を用いて求める。最後にその解析結果を用いて、標準型とタンデム型のトラヒック特性を比較検討し、ノード処理時間の影響について論じる。

最後に第7章で、本論文のまとめと今後の課題について述べる。

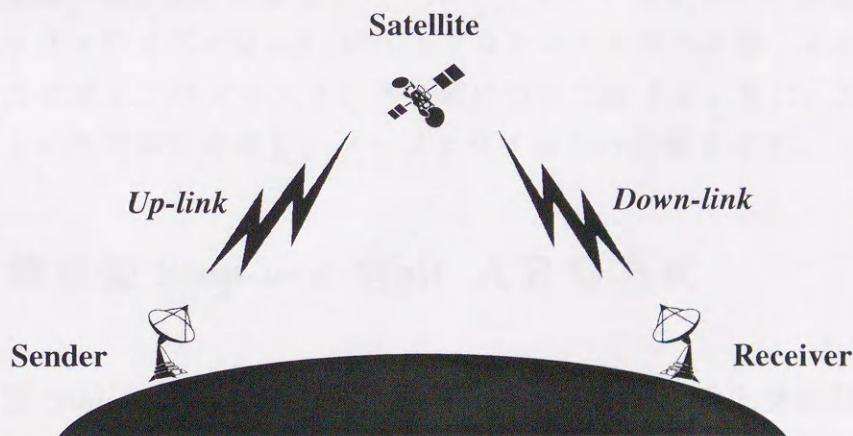


図1 衛星通信システム概念図

Fig.1 Satellite communication system.

第 2 章 タンデム型 Stop-and-Wait A R Q方式のスループット特性

2.1 序 言

本章では、衛星本体にバッファリング機能、誤り検出機能、再送要求機能ならびに再送機能を持たせた A R Q 方式の最も基本的な方式である Stop-and-Wait 方式のスループット特性についてその厳密解析を行い、衛星内バッファサイズのスループットに関する影響について考察する。まず、2.2 では標準型 Stop-and-Wait 方式についてまとめる。2.3 では標準型 Stop-and-Wait 方式を自然な形で拡張したタンデム型 Stop-and-Wait 方式(中継再送用バッファサイズ=1)における伝送プロトコルとそのスループット解析について述べる。2.4 では更にバッファサイズを増加させた場合(中継再送用バッファサイズ= $M \geq 2$)の伝送プロトコルを述べた後、スループットの厳密式を求め、バッファリング効果について論ずる。更に、2.5 でスループットの改善率を定義し、バッファサイズとの関係を示す。

2.2 標準型 Stop-and-Wait A R Q 方式

標準型 Stop-and-Wait A R Q 方式は、地上送信局と地上受信局とが衛星を介してパケットの伝送を行う際、衛星が地上送信局から受信したパケットを直ちに地上受信局へ送出するものである。地上送信局は、送出したパケットに対する地上受信局からの確認信号(ACK/NACK)を受信するまで次のパケットの送出はしない。ACK を受信すれば新しいパケットを、NACK を受信すれば再送を行う。ここで、①伝送すべきパケットを常に有する、

②パケット伝送の誤りはランダムに発生する、③確認信号(ACK/NACK)に誤りは生じないものと仮定する。図 2.1 より、1つのパケットを伝送するのに要するスロット数を β_s とすると、その平均は

$$E[\beta_s] = \frac{2D+1}{P_u P_d} \quad (2.1)$$

となり、スループット η_s はその逆数、

$$\eta_s = \frac{P_u P_d}{2D+1} \quad (2.2a)$$

で与えられる。但し、 $E[\cdot]$ は確率変数 \cdot の平均を表すものとする。また、 P_u, P_d はそれぞれアップリンク（地上送信局から衛星に至るリンク）ならびにダウンリンク（衛星から地上受信局に至るリンク）におけるパケットの伝送成功確率である。また、 D はラウンドトリップ伝搬遅延（地上送信局のパケット送信開始から地上受信局への到達時間）である。

スループット η_s の最大値 $\eta_{s,\max}$ は $P_u = P_d = 1$ のときに与えられ、

$$\eta_{s,\max} = \frac{1}{2D+1} \quad (2.2b)$$

となり、 $D \gg 1$ なる場合にはラウンドトリップ伝搬遅延 D の2倍に逆比例してスループットが劣化することがわかる。

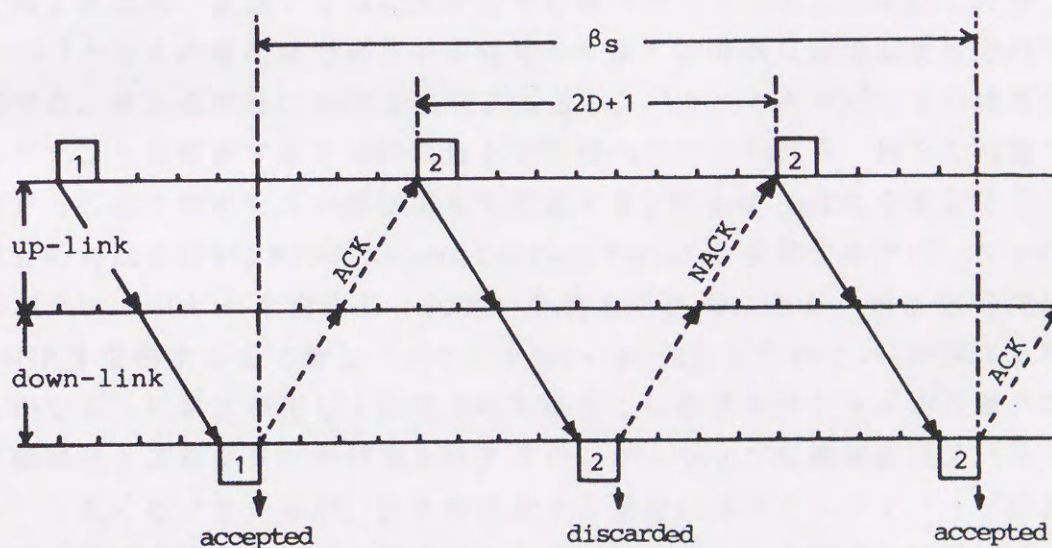


図 2.1 標準型 Stop-and-Wait ARQ 方式

Fig.2.1 Standard Stop-and Wait ARQ scheme.

2.3 タンデム型 Stop-and-Wait A R Q方式

タンデム型 Stop-and-Wait A R Q方式は、衛星本体にパケットの誤り検出機能、地上送信局への再送要求機能、パケットのバッファリング機能ならびに地上受信局への再送機能をもたせることにより、ラウンドトリップ伝搬遅延の短縮を図るものである。しかし、これらの機能を衛星にもたせることにより、標準型ではみられなかった衛星でパケットが受信されるのに要する時間が付加され、ラウンドトリップ伝搬遅延の増大へとつながる。従って、タンデム型は標準型に比べ常にスループットが改善されるとは限らない。

そこで、標準型 Stop-and-Wait A R Q方式に関して中継再送用バッファを1個設け、単純に拡張したタンデム型について考察する。

2.3.1 伝送プロトコル(中継再送用バッファサイズ=1の場合)

図 2.2 においてパケット # n が地上送信局より送出され衛星に到達する。衛星は # n を受信した後に誤り検出を行い、直ちに確認信号(HOLD/NACK)を地上送信局へ返送する(HOLD 信号とはパケットを正しく受信したが、次のパケットの送出を停止させる信号とする)。受信に成功し受理された場合は、地上送信局に HOLD 信号を返送し、パケットのコピーを中継再送用バッファに格納すると同時に地上受信局への送出を行う。地上受信局では # n の誤り検出を行い確認信号を返送する。衛星は NACK を受信すると # n の再送を行い、RFNP(Request For Next Packet)を受信するとバッファ内のパケットコピーを消去し、RFNP を地上送信局に送る。地上送信局は RFNP を受信するまで新しいパケット(# $n+1$)の送出を行わない。同図より明らかのように # n が正しく伝送される場合には衛星でパケットが受信される時間(1スロット)が付加されてラウンドトリップ伝搬遅延は2 ($D+1$)と長くなっているが、誤りが発生する場合にはラウンドトリップ伝搬遅延の短縮が行われている様子がわかる。従って、この方式と標準方式はパケット伝送成功確率に関してトレードオフが存在している。

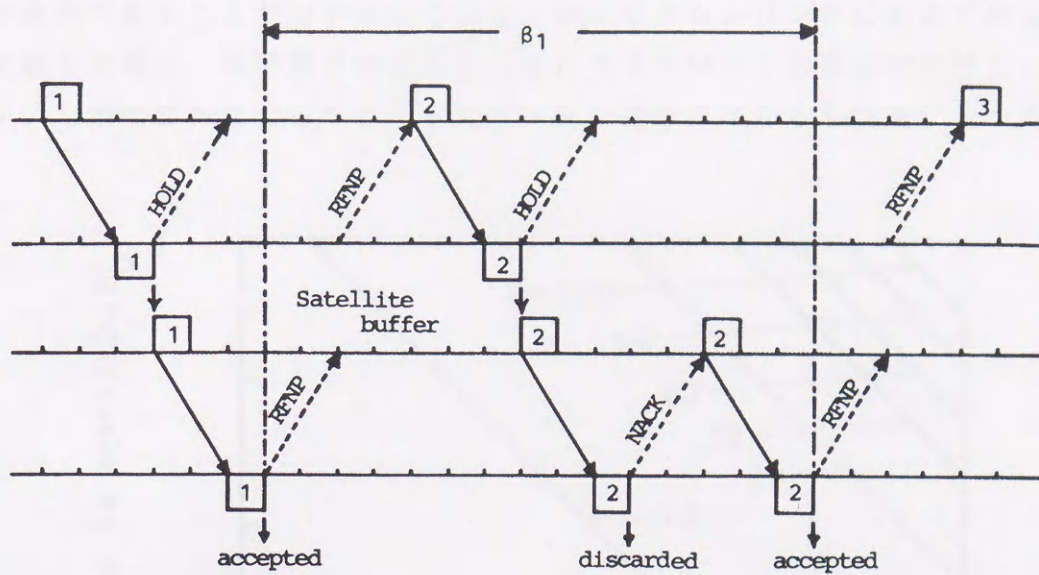


図 2.2 タンデム型 Stop-and-Wait ARQ 方式 (バッファサイズ = 1)

Fig.2.2 Tandem Stop-and Wait ARQ scheme (buffer size=1).

2.3.2 スループット解析

図 2.2 において、# n が地上受信局に受理された時点から # $n+1$ が受理されるまでのスロット数 β_1 を求める。# n が成功するとダウンリンクおよびアップリンクでの RFNP が返送された後 # $n+1$ が送出され始め、アップリンクおよびダウンリンクにおける伝送/再送を繰り返した後 # $n+1$ が地上受信局に受理されるので、 β_1 の平均は

$$E[\beta_1] = \frac{(D+1)(P_u + P_d)}{P_u P_d} \quad (2.3)$$

で与えられる。従って、スループット η_1 は

$$\eta_1 = \frac{P_u P_d}{(D+1)(P_u + P_d)} \quad (2.4a)$$

となり、その最大値 $\eta_{1,\max}$ は

$$\eta_{1,\max} = \frac{1}{2(D+1)} \quad (2.4b)$$

となる。

式(2.2a),(2.4a)から標準型とタンデム型 (バッファサイズ = 1) との比較を行うと図 2.3 に示されるようなトレードオフが存在する。同図より P_u, P_d が低く、またラウンドトリップ伝搬遅延 D が長くなるほどタンデム型の方

が有利であることがわかる。これは、例えばダウンリンクにおいて伝送に失敗した場合、標準型は少なくとも $2D + 1$ スロット必要なのに対し、タンデム型では少なくとも $D + 1$ スロットで済むことから容易にわかる。

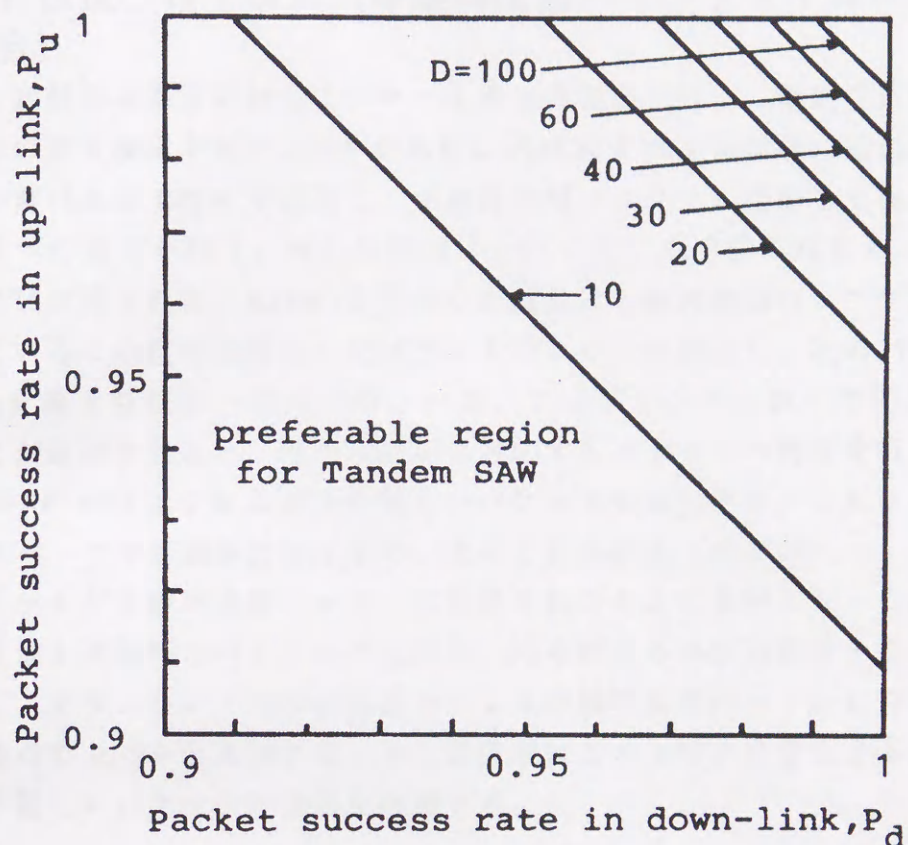


図 2.3 標準型とタンデム型 Stop-and-Wait ARQ 方式のトレードオフ

Fig.2.3 Trade-off relation of Standard- and Tandem-
Stop-and-Wait ARQ scheme.

2.4 バッファリング効果

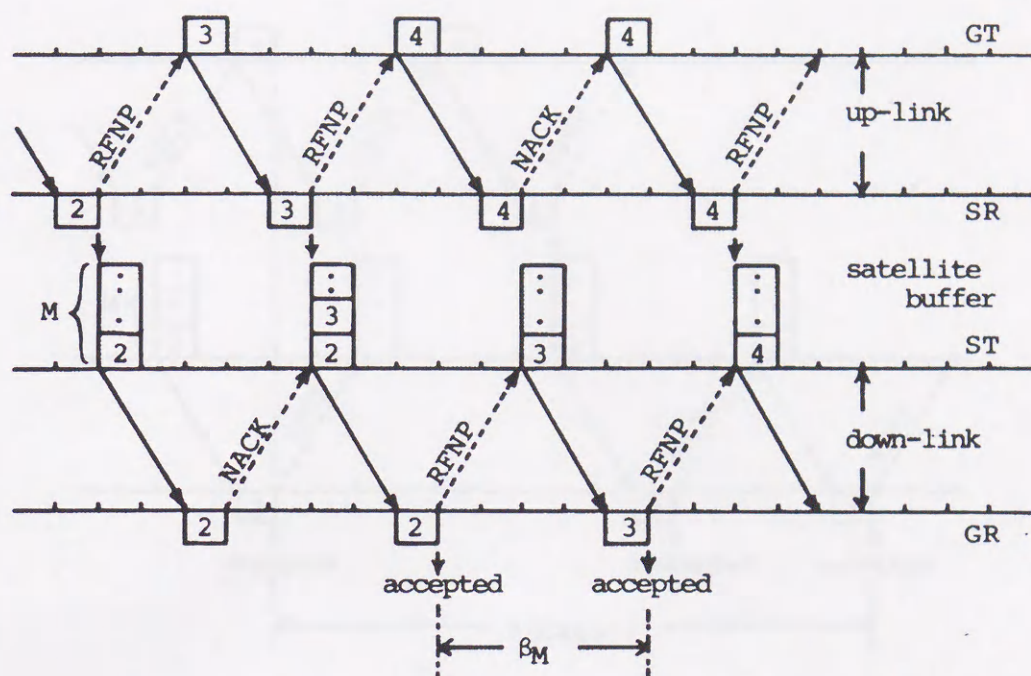
前節で考察したプロトコルでは $\#n$ がダウンリンクで成功したとき、 $\#n + 1$ は常に地上送信局に存在する。この原因は中継再送用バッファのサイズにある。バッファサイズが 1 個であると $\#n + 1$ は $\#n$ がバッファから消去されるまで格納されるチャンスはない。従って、バッファサイズを複数個にすると $\#n$ のダウンリンクでの成功如何にかかわらず、 $\#n + 1$

を中継再送用バッファに格納することができ、スループットの向上が期待できる。そこで、本節では中継再送用バッファを複数個 (≥ 2) 設けた場合について考察する。

2.4.1 伝送プロトコル (中継再送用バッファサイズ = $M \geq 2$ の場合)

地上送信局は衛星に対してパケット # n の送出を行う。衛星受信機はパケットの誤り検出を行い、誤りがあれば NACK を地上送信局に返送する。誤りが無ければ RFNP を返送し、中継再送用バッファに格納した後、地上受信局への送出を行う。地上受信局において正しく受信されると、RFNP が衛星に返送される。RFNP を受信した衛星は中継再送用バッファに蓄積されているこの信号に対応したパケットのコピーを消去し、次のパケット (# $n+1$) を地上受信局へ送出する。一方、アップリンクにおいて衛星から NACK が返送されると、地上送信局は対応するパケットの再送を行う。また、RFNP が返送されると次の新しいパケットを送出する。これは、中継再送用バッファが満杯になるまで、次々に行われる (図 2.4)。

パケットが中継再送用バッファに格納されたときに満杯となった場合、衛星は地上送信局へパケットの送出を一時中断する HOLD 信号を返送する。そして、ダウンリンクでの伝送成功により中継再送用バッファに空きが生じた時点で RFNP を返送する。地上送信局はこの RFNP を受信することによって新しいパケットの送出を再開する。

図 2.4 タンデム型 Stop-and-Wait ARQ 方式 (バッファサイズ ≥ 2)Fig.2.4 Tandem Stop-and Wait ARQ scheme (buffer size ≥ 2).

2.4.2 スループット解析

任意のパケット # n がダウンリンクにおいて成功した時点、即ち地上受信局で受理された時点から、次のパケット # $n+1$ が受理されるまでに要するスロット数 β_M を求める。ここで中継再送用バッファの個数を M (≥ 2) とする。# n がダウンリンクで成功したとき、# $n+1$ はアップリンク (地上送信局の送出終了時点) にあるか、あるいは中継再送用バッファの中に存在する。前者を Case1 (図 2.5)、後者を Case2 (図 2.6) とする。

n がダウンリンクで成功した時点から、# n + 1 が成功するまでに要する平均スロット数は、それぞれ、

$$E\{\beta|Case1\} = (D+1) \left[1 + \frac{P_d(1-P_u) + P_u(1-P_d)}{P_u P_d} \right] \quad (2.5a)$$

$$E\{\beta|Case2\} = (D+1) \left[1 + \frac{1-P_d}{P_d} \right] \quad (2.5b)$$

となる。

次に事象 Case1 の起こる確率 $Prob\{Case1\}$ を求める。# n がアップリンクで成功したとき、中継再送用バッファに自分自身を含めて K 個 ($1 \leq K \leq M-1$) のパケットが蓄積しているものとする。事象 Case1 の起こる確率は、 K 個のパケットの再送回数の合計が i 回であるとき、# n + 1 がアップリンクで $i+K-1$ 回失敗する確率に等しい。従って、 $Prob\{Case1 | K\}$ は式(2.6)で与えられる。

$$Prob\{Case1|K\} = \sum_{i=0}^{\infty} \{K \text{ 個のパケットの再送回数合計} = i\} (1-P_u)^{i+K-1} \quad (2.6)$$

ここで、1 個のパケットの再送回数に関する確率母関数 $G(z)$ は

$$G(z) = \frac{P_d}{1-z(1-P_d)} \quad (2.7)$$

であり、 K 個のパケットの再送回数に関する確率母関数は $\{G(z)\}^K$ で与えられる。従って、

$$Prob\{Case1|K\} = \frac{1}{1-P_u} \left[\frac{P_d(1-P_u)}{1-x} \right]^K \quad (2.8a)$$

但し、 $x = (1-P_u)(1-P_d)$ 、 $1 \leq K \leq M-1$ である。

一方、# n がアップリンクで成功することによって、中継再送用バッファが満杯 (M 個) になった場合、先頭 ($\#n-M+1$) のパケットが成功して RFNP 信号が地上送信局に送出されるまでは # n + 1 は衛星への送出ができない。従って、先頭のものを除いた $M-1$ 個のパケットの再送回数合計のみを考慮すればよいことになる。これより $Prob\{Case1 | M\}$ は

$$Prob\{Case1|M\} = \frac{1}{1-P_u} \left[\frac{P_d(1-P_u)}{1-x} \right]^{M-1} \quad (2.8b)$$

となる。結局、事象 Case1 の起こる確率は式(2.9)で与えられる。

$$Prob\{Case1\} = \frac{1}{1-P_u} P \left[\frac{P_d(1-P_u)}{1-x} \right] \quad (2.9)$$

但し、

$$P(z) = \sum_{K=1}^{M-1} P_K z^K + P_M z^{M-1} \quad (2.10)$$

であり、 P_K は # n がバッファに格納されたときに蓄積されているパケットの個数が K 個である確率とする。

任意のパケット # n が中継再送用バッファに格納されたとき、自分自身を含めて K 個のパケットが蓄積されているものとする。但し、 $K \leq M-1$ とする。

今、# $n+1$ がアップリンクにおいて伝送されているとき、バッファ内のパケットがダウンリンクで成功すればバッファ内のパケット数が減少する。従って、# $n+1$ の再送回数が i 回のときに R 個のパケットが伝送に成功する確率 $\text{Prob}\{R|i\}$ は式(2.11a),(2.11b)となる。

$$\text{Prob}\{R|i\} = \binom{i+1}{R} P_d^R (1-P_d)^{i+1-R} \quad (i \geq R-1, R=1,2,\dots,K-1) \quad (2.11a)$$

$$\text{Prob}\{K|i\} = P_d^K \sum_{j=1}^{i-K+2} \binom{K+j-2}{K-1} (1-P_d)^{j-1} \quad (i \geq K-1) \quad (2.11b)$$

これらの結果を用い、# n がバッファに格納されたときに K 個のパケットが蓄積している状態から、# $n+1$ がバッファに格納されて $K-R+1$ 個になる遷移確率 $P\{K-R+1|K\}$ は式(2.12a)で与えられる。また、# n がバッファに格納されることによってバッファが満杯($K=M$)となる場合は、バッファの先頭パケットが伝送に成功し、消去されないと # $n+1$ はバッファに入る可能性がないことから、先頭のものを除いた $M-1$ 個に関する遷移を考慮して式(2.12b)が与えられる。

$$\left. \begin{aligned} P[K-R+1|K] &= \frac{P_u}{(1-P_u)(1-x)} \left[\frac{P_d(1-P_u)}{1-x} \right]^R \\ &= b_R \quad (1 \leq R \leq K-1, 2 \leq K \leq M-1) \\ P[1|K] &= \frac{1}{1-P_u} \left[\frac{P_d(1-P_u)}{1-x} \right]^K = a_K \quad (1 \leq K \leq M-1) \\ P[K+1|K] &= \frac{P_u(1-P_d)}{1-x} = b_0 \quad (1 \leq K \leq M-1) \end{aligned} \right\} \quad (2.12a)$$

$$\left. \begin{aligned} P[M-R|M] &= \frac{P_u}{(1-P_u)(1-x)} \left[\frac{P_d(1-P_u)}{1-x} \right]^R \\ &= b_R \quad (1 \leq R \leq M-2) \\ P[1|M] &= \frac{1}{1-P_u} \left[\frac{P_d(1-P_u)}{1-x} \right]^{M-1} = a_{M-1} \\ P[M|M] &= \frac{P_u(1-P_d)}{1-x} = b_0 \end{aligned} \right\} \quad (2.12b)$$

式(2.12a),(2.12b)を用いた状態方程式は式(2.13)となる。

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= P_1 a_1 + P_2 a_2 + P_3 a_3 + \cdots + P_{M-1} a_{M-1} + P_M a_{M-1} \\ P_2 &= P_1 b_0 + P_2 b_1 + P_3 b_2 + \cdots + P_{M-1} b_{M-2} + P_M b_{M-2} \\ &\vdots \\ P_{M-1} &= P_{M-2} b_0 + P_{M-1} b_1 + P_M b_1 \\ P_M &= P_{M-1} b_0 + P_M b_0 \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

この状態方程式を式(2.10)を用いて解くと、

$$P(z) = \frac{B(z)}{A(z)} \quad (2.14a)$$

$$B(z) = \frac{P_u(1-P_d)}{1-x} Y z^{M-1} - \frac{P_d z}{(1-x)z - (1-P_u)P_d} P \left[\frac{P_d(1-P_u)}{1-x} \right] \quad (2.14b)$$

$$A(z) = \frac{P_u(1-P_d)z - P_d(1-P_u)}{(1-x)z - (1-P_u)P_d} \quad (2.14c)$$

となる。但し、 $Y = P_{M-1} + P_M$ である。

$P(1)=1$ より、式(2.14a)に $z=1$ を代入すると、

$$\frac{P_d}{P_u - P_d} P \left[\frac{P_d(1-P_u)}{1-x} \right] = \frac{P_d(1-P_d)}{(P_u - P_d)(1-x)} Y - 1 \quad (2.15)$$

となる。次に関数 $P(z)$ は正則であるから分母 $(A(z)) = 0$ なる点 $z=z_0$ において分子 $(B(z)) = 0$ とならなければならず、式(2.16)を得る。

$$Y = P \left[\frac{P_d(1-P_u)}{1-x} \right] \frac{1-x}{P_u(1-P_d)} \left[\frac{P_u(1-P_d)}{P_d(1-P_u)} \right]^{M-1} \quad (2.16)$$

結局、式(2.15),(2.16)より式(2.17)が得られる。

$$P \left[\frac{P_d(1-P_u)}{1-x} \right] = \frac{(P_u - P_d) P_d^{M-1} (1-P_u)^{M-1}}{P_u^M (1-P_d)^{M-1} - P_d^M (1-P_u)^{M-1}} \quad (P_u \neq P_d) \quad (2.17)$$

また、 $P_u = P_d = P_c$ の場合、 $P(z)$ は

$$P(z) = \frac{z(2-P_c)-1+P_c}{(1-P_c)(z-1)} \left[\frac{1-P_c}{2-P_c} Y z^{M-1} - \frac{z}{z(2-P_c)-1+P_c} P \left[\frac{P_d(1-P_u)}{1-x} \right] \right] \quad (2.18)$$

となる。 $P(1)=1$ より、L'Hospitalの定理を用いると式(2.19)が得られる。

$$P \left[\frac{P_d(1-P_u)}{1-x} \right] = 1 - \frac{M-1}{2-P_c} Y \quad (2.19)$$

更に、式(2.18)より $z=1$ なる点 $z=z_0$ において $P(z)$ は正則であることから

$$Y = \frac{2-P_c}{1-P_c} P \left[\frac{P_d(1-P_u)}{1-x} \right] \quad (2.20)$$

を得る。結局、式(2.19),(2.20)より式(2.21)が得られる。

$$P \left[\frac{P_d(1-P_u)}{1-x} \right] = \frac{1-P_c}{M-P_c} \quad (P_u = P_d = P_c) \quad (2.21)$$

式(2.17),(2.21)を式(2.9)に代入すると、

$$\text{Prob}\{\text{Case1}\} = \frac{(P_u - P_d) P_d^{M-1} (1-P_u)^{M-2}}{P_u^M (1-P_d)^{M-1} - P_d^M (1-P_u)^{M-1}} \quad (P_u \neq P_d) \quad (2.22a)$$

$$\text{Prob}\{\text{Case1}\} = \frac{1}{M-P_c} \quad (P_u = P_d = P_c) \quad (2.22b)$$

が得られる。

一方、事象 Case2 の起こる確率は、Case1 の補事象であるから

$$\text{Prob}\{\text{Case2}\} = 1 - \text{Prob}\{\text{Case1}\} \quad (2.23)$$

となる。

以上、式(2.5a)~(2.23)より、任意のパケット1個を伝送するのに要する平均スロット数 $E[\beta_M]$ は

$$E[\beta_M] = \frac{(D+1)(1-P_u)}{P_u} \left[\frac{(P_u - P_d) P_d^{M-1} (1-P_u)^{M-2}}{P_u^M (1-P_d)^{M-1} - P_d^M (1-P_u)^{M-1}} \right] + (D+1) \left[1 + \frac{1-P_d}{P_d} \right] \quad (P_u \neq P_d) \quad (2.24a)$$

$$E[\beta_M] = \frac{(D+1)(1-P_c)}{P_c(M-P_c)} + (D+1) \left[1 + \frac{1-P_c}{P_c} \right] \quad (P_u = P_d = P_c) \quad (2.24b)$$

となる。

式(2.24a)より $P_u=1$ の場合、 $E[\beta_M]$ は

$$E[\beta_M] = (D+1) \left[1 + \frac{1-P_d}{P_d} \right] \quad (2.25a)$$

となり、システムの性能はダウンリンクのみの Stop-and-Wait 方式となる。

同様に $P_d=1$ の場合、 $E[\beta_M]$ は

$$E[\beta_M] = (D+1) \left[1 + \frac{1-P_u}{P_u} \right] \quad (2.25b)$$

となりシステムの性能はアップリンクのみの Stop-and-Wait 方式となる。

また、 $P_u=P_d=1$ の場合、 $E[\beta_M]$ は $D+1$ となる。

これより、ラウンドトリップ伝搬遅延は標準型の場合の半分となり、伝搬遅延の短縮効果が表れていることがわかる。

2.5 スループット特性

標準型ならびにタンデム型 Stop-and-Wait ARQ 方式のスループット特性を図 2.7～図 2.10 に示す。これらの特性はラウンドトリップ伝搬遅延 $D=64$ の場合で、図 2.7, 図 2.8 はそれぞれ $P_u=1, 0.8$ 、図 2.9 は $P_u=P_d$ について描いている。横軸はダウンリンクにおけるパケット誤り率 $(1-P_d)$ である。図より $M \geq 2$ のタンデム型は常に標準型より優れていることがわかる。また、図 2.8, 図 2.9 から、スループット η は中継再送用バッファ M の単調増加関数であることがわかる。これは、バッファを増せばそれだけ $\# n+1$ がアップリンクに存在する可能性が低くなり、バッファ内に存在する Case2 の確率が高くなるためである。

そこで、スループットのバッファサイズに対する変化率が最大となる $P_u=P_d$ においてスループット改善率 γ を式(2.26)で定義し、 γ と M の関係を表したのが図 2.10 である。

$$\gamma = \frac{\eta_M}{\eta_\infty} = \frac{M - P_c}{M - 2P_c + 1} \quad (2.26)$$

即ち、 γ はバッファサイズが M の場合のスループット η_M が、 M を無限大にしたときのスループット η_∞ (限界値) に対してどこまで改善されているかを示したものである。例えば、 P_c が 0.8 以上の場合は、20 個程度のバッファ容量を設けることにより限界値の 99% 以上のスループットを確保できることがわかる。

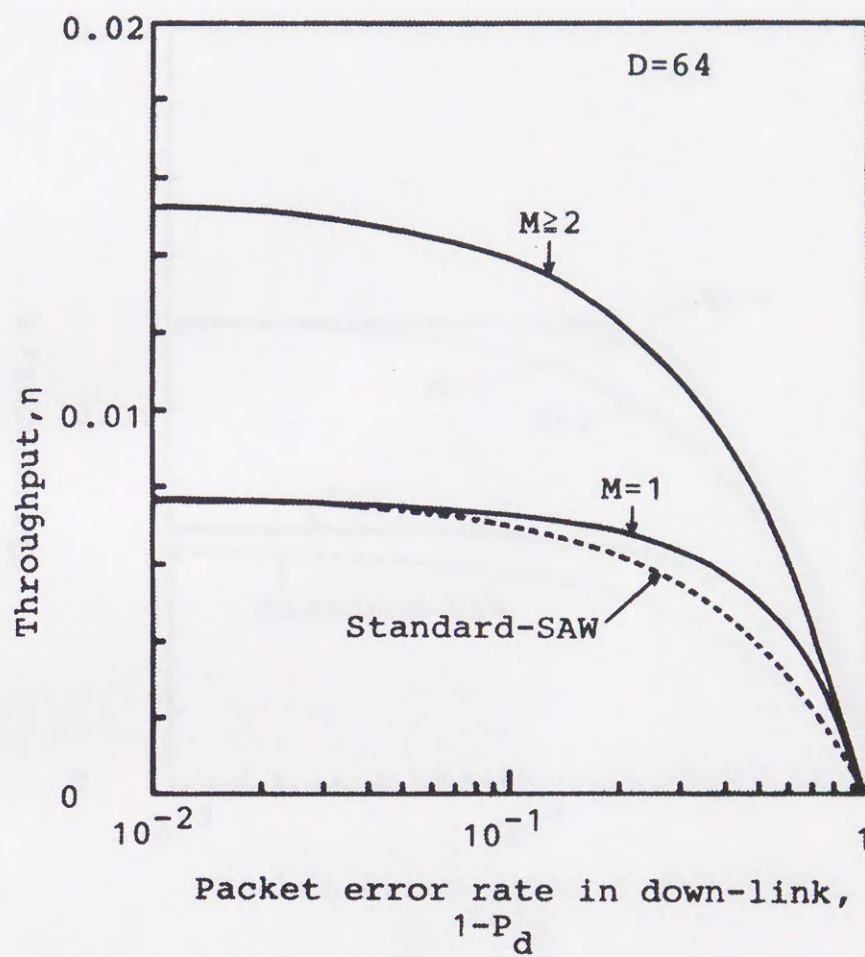
図 2.7 スループット特性 ($P_u=1$)

Fig.2.7 Throughput performance of Tandem Stop-and-Wait ARQ scheme in the case of $P_u=1$.

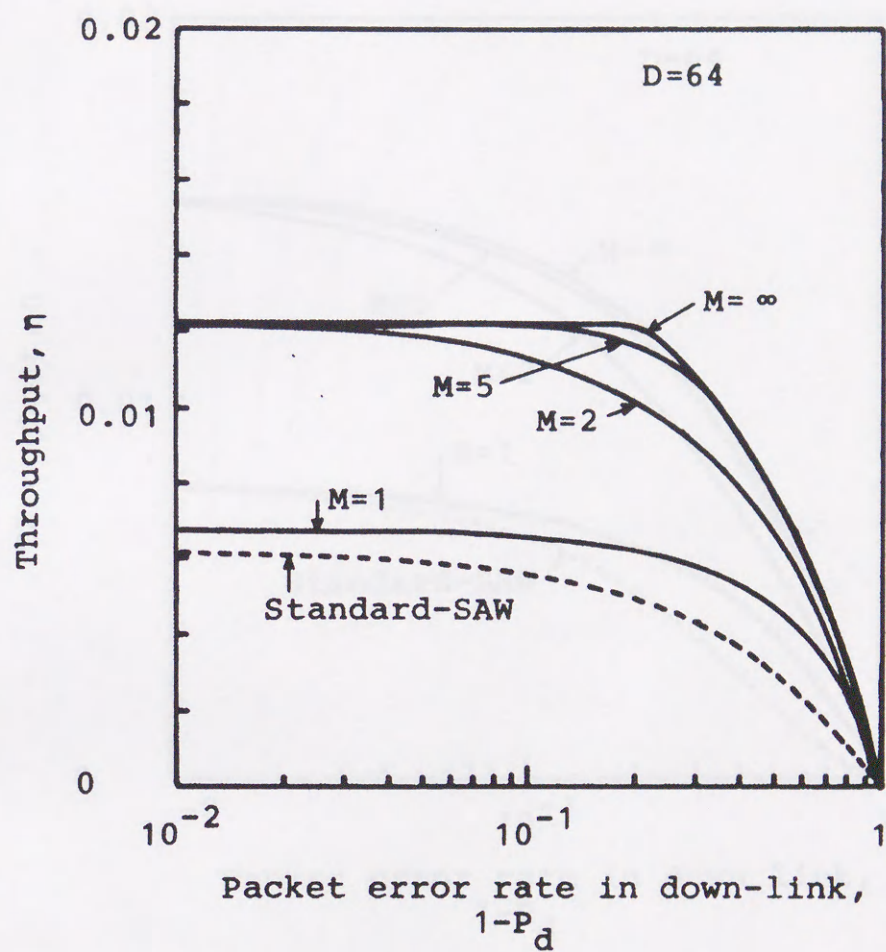


図 2.8 スループット特性 ($P_u=0.8$)

Fig.2.8 Throughput performance of Tandem Stop-and-Wait ARQ scheme in the case of $P_u=0.8$.

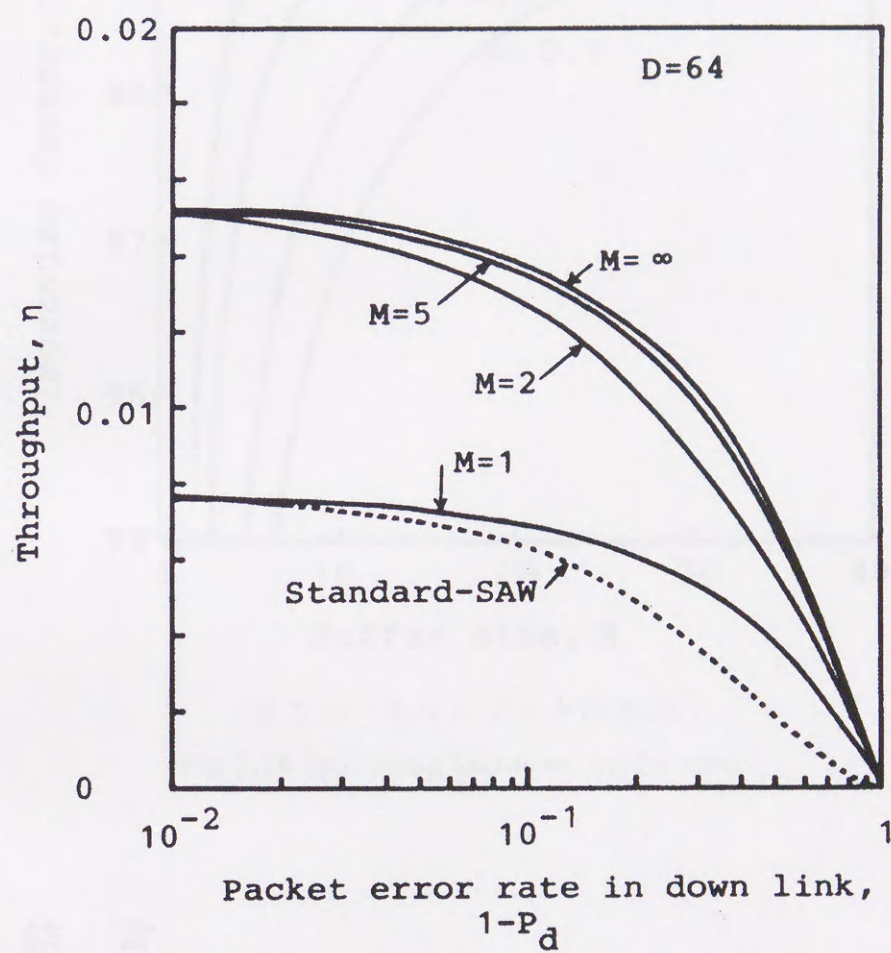
図 2.9 スループット特性 ($P_u=P_d$)

Fig.2.9 Throughput performance of Tandem Stop-and-Wait ARQ scheme in the case of $P_u=P_d$.

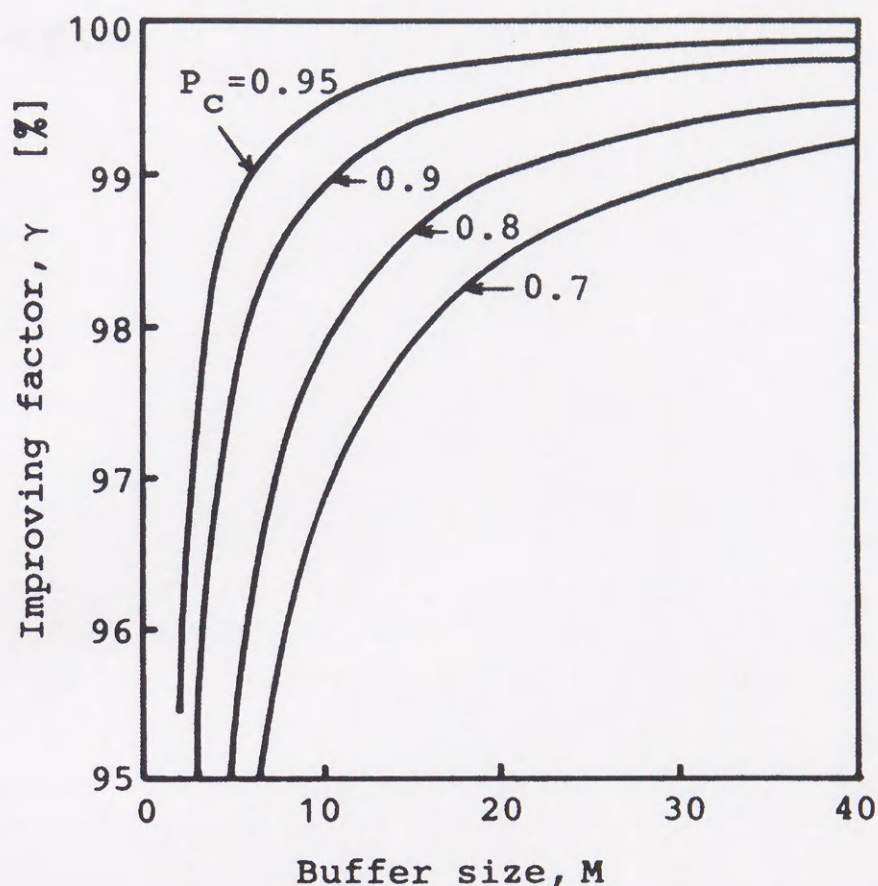


図 2.10 スループット改善率

Fig.2.10 Improving factor vs. buffer size.

2.6 結 言

本章では、タンデム型の Stop-and-Wait ARQ 方式について、そのバッファリング効果をスループットの観点より考察した。

タンデム型の Stop-and-Wait ARQ 方式では、衛星がパケットを受信するのに要する時間を考慮しなければならないため、中継再送用バッファサイズが1のタンデム型と標準型の間にはトレードオフが存在するが、バッファサイズが2以上の場合は標準型よりも常に優れていることが示された。

また、スループット η_M はバッファ容量 M (≥ 2) の単調増加関数であることから、バッファを無限大用意したスループットの限界値 η_∞ に対する

η_M をスループット改善率として定義し、バッファサイズ的设计指針の一つとして提案した。

第3章 タンデム型 Stop-and-Wait ARQ方式の伝送遅延特性

3.1 概 説

本章では、有線伝送の半双方向通信プロトコルとして、タンデム型 Stop-and-Wait ARQ方式の伝送遅延特性について、解析と数値計算を行い、その特性を明らかにする。まず、3.1で半双方向通信プロトコルとして、タンデム型 Stop-and-Wait ARQ方式の伝送遅延特性について解析する。次に、3.2では、有線伝送の半双方向通信プロトコルとして、タンデム型 Stop-and-Wait方式の伝送遅延特性を解析し、その特性を明らかにする。3.3では、有線伝送の半双方向通信プロトコルとして、タンデム型 Stop-and-Wait方式の伝送遅延特性を解析し、その特性を明らかにする。3.4では、有線伝送の半双方向通信プロトコルとして、タンデム型 Stop-and-Wait方式の伝送遅延特性を解析し、その特性を明らかにする。3.5では、有線伝送の半双方向通信プロトコルとして、タンデム型 Stop-and-Wait方式の伝送遅延特性を解析し、その特性を明らかにする。3.6では、有線伝送の半双方向通信プロトコルとして、タンデム型 Stop-and-Wait方式の伝送遅延特性を解析し、その特性を明らかにする。3.7では、有線伝送の半双方向通信プロトコルとして、タンデム型 Stop-and-Wait方式の伝送遅延特性を解析し、その特性を明らかにする。3.8では、有線伝送の半双方向通信プロトコルとして、タンデム型 Stop-and-Wait方式の伝送遅延特性を解析し、その特性を明らかにする。3.9では、有線伝送の半双方向通信プロトコルとして、タンデム型 Stop-and-Wait方式の伝送遅延特性を解析し、その特性を明らかにする。3.10では、有線伝送の半双方向通信プロトコルとして、タンデム型 Stop-and-Wait方式の伝送遅延特性を解析し、その特性を明らかにする。

3.2 標準型 Stop-and-Wait ARQ方式の伝送遅延解析

析

伝送遅延特性を解析する状況として、図2-1-1の伝送遅延特性を示す。

第 3 章 タンデム型 Stop-and-Wait A R Q方式の伝送遅延特性

3.1 序 言

本章では、有限容量の中継再送用バッファをもつタンデム型 Stop-and-Wait A R Q方式の伝送遅延特性について、特に中継再送用バッファの効果という観点から考察する。まず、3.2 で中継再送用バッファをもたない標準型 Stop-and-Wait A R Q方式における伝送遅延特性について概説する。次に 3.3 では有限容量の中継再送用バッファを設けたタンデム型 Stop-and-Wait 方式について伝送遅延の母関数を導出し、それを用いてパケットの平均伝送遅延を求める。3.4 では平均伝送遅延に対するアップリンクならびにダウンリンクの伝送成功確率やラウンドトリップ伝搬遅延、更には中継再送用バッファ容量の影響について論じる。その結果、平均伝送遅延特性についてもタンデム型 Stop-and-Wait A R Q方式は中継再送用バッファをもたない標準型に比べて優れていることを示す。更に、遅延改善率（平均伝送遅延の改善限界を与えるバッファサイズが無限大の平均伝送遅延に対する比）を定義し、スループットの観点のみならず、平均伝送遅延をも併せて考慮したバッファサイズの設計指針を提案している。

3.2 標準型 Stop-and-Wait A R Q方式の伝送遅延解析

伝送遅延解析に際する仮定として、①アップリンク（地上送信局から衛

星に至るリンク)でのパケットの伝送成功確率を P_u とする。また、ダウンリンク(衛星から地上受信局に至るリンク)でのパケットの伝送成功確率を P_d とする。②パケット伝送の誤りは各リンクにおいて独立にかつランダムに発生する。③確認信号(ACK/NACK/HOLD)に誤りは生じないものと仮定する。④地上送信局へのパケットの到着過程は、スロット毎に独立で、平均 m_A 、分散 σ_A^2 の一般分布であり、その母関数を $G_A(z)$ とする。⑤各リンクにおけるラウンドトリップ伝搬遅延を D スロットとする。⑥1つのパケットが地上受信局で受理されてから次のパケットが受理されるまでの経過スロット数を実効サービス時間とし、この時間に関する確率分布の母関数を $G_V(z)$ 、平均 m_V 、分散 σ_V^2 とする。

また、本章における伝送プロトコルは、第2章における伝送プロトコル(図2.1)と同じであるものとする。

連続型 ARQ方式の伝送遅延は Towsley and Wolf によって解析されており[32]、これを2つのリンク(アップ/ダウンリンク)から成るシステムに適用する。

パケットの伝送遅延をパケットが地上送信局に到着した時点から地上送信局がそのパケットに対する地上受信局からの ACK を受信するまでの経過スロット数と定義すると、伝送遅延 T は

$$T = T_q + T_t \quad (3.1)$$

で与えられる。ここで、 T_q は実効列待ち時間(パケットが地上送信局に到着してから伝送待機用バッファの先頭に至るまでに要する時間)、 T_t はパケットの伝送開始時点から、地上送信局において ACK を受信するまでの時間を表す確率変数である。 T_q 、 T_t の確率母関数ならびに平均を $G_{T_q}(z)$ 、 $G_{T_t}(z)$ ならびに m_{T_q} 、 m_{T_t} とすると、確率変数 T の母関数 $G_T(z)$ ならびにその平均 m_T は

$$G_T(z) = G_{T_q}(z)G_{T_t}(z) \quad (3.2)$$

$$m_T = m_{T_q} + m_{T_t} \quad (3.3)$$

で与えられる。ここで、実効列待ち時間の母関数ならびにその平均は、それぞれ、

$$G_{T_q}(z) = \frac{(1 - m_A m_V)(z - 1)\{1 - G_A(G_V(z))\}}{m_A(1 - G_V(z))\{z - G_A(G_V(z))\}} \quad (3.4)$$

$$m_{T_q} = \frac{\sigma_A^2 m_V + m_A^2 \sigma_V^2}{2m_A(1 - m_A m_V)} - \frac{m_V}{2} \quad (3.5)$$

で与えられる[32]。

標準型 Stop-and-Wait 方式の実効サービス時間分布の母関数 $G_{V,SSAW}(z)$ 、平均 $m_{V,SSAW}$ ならびに分散 $\sigma_{V,SSAW}^2$ は、それぞれ、

$$\begin{aligned} G_{V,SSAW}(z) &= \sum_{i=0}^{\infty} (1 - P_u P_d)^i P_u P_d z^{(2D+1)(i+1)} \\ &= \frac{P_u P_d z^{2D+1}}{1 - (1 - P_u P_d) z^{2D+1}} \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} m_{V,SSAW} &= \left. \frac{dG_{V,SSAW}(z)}{dz} \right|_{z=1} \\ &= \frac{2D+1}{P_u P_d} \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{V,SSAW}^2 &= \left. \frac{d^2 G_{V,SSAW}(z)}{dz^2} \right|_{z=1} + m_{V,SSAW} - m_{V,SSAW}^2 \\ &= \frac{(1 - P_u P_d)(2D+1)^2}{P_u^2 P_d^2} \end{aligned} \quad (3.8)$$

で与えられる。第2章の図2.1に示すように Stop-and-Wait 方式ではパケットの伝送開始時点から、地上送信局において ACK を受信するまでの時間は実効サービス時間に等しい。従って、式(3.6)～式(3.8)を式(3.2)～式(3.5)に代入すると、標準型 Stop-and-Wait 方式の伝送遅延分布の母関数 $G_{T,SSAW}(z)$ ならびに平均 $m_{T,SSAW}$ が求められる。

3.3 タンデム型 Stop-and-Wait A R Q方式の伝送遅延解析

有限容量の中継再送用バッファを設けたタンデム型では、パケット (# $n+1$) はパケット (# n) のダウンリンクでの成功如何にかかわらず中継再送用バッファに格納されることが可能となり、ラウンドトリップ伝搬遅延を実質的に縮小できる効果が期待される。

中継再送用のバッファサイズが M 個 (≥ 2) の場合、送信側が伝送すべきパケットを常に有していると仮定すれば、パケット # n がダウンリンクで成功したとき次のパケット (# $n+1$) はアップリンク (地上送信局の送出終了時点) にあるか、あるいは中継再送用バッファの中に存在するか

のいずれかである。第2章の場合と同様に、前者を Case1 (図 2.5)、後者を Case2 (図 2.6) とする。Case1 ならびに Case2 にある場合、# n が成功してから # n + 1 が成功するまでに要するスロット数の母関数 $G_{V1}(z)$ ならびに $G_{V2}(z)$ は、それぞれ、

$$G_{V1}(z) = \frac{P_u P_d z^{D+1}}{\{1 - (1 - P_u)z^{D+1}\} \{1 - (1 - P_d)z^{D+1}\}} \quad (3.9a)$$

$$G_{V2}(z) = \frac{P_d z^{D+1}}{1 - (1 - P_d)z^{D+1}} \quad (3.9b)$$

で与えられる。

事象 Case1 の発生する確率 $\text{Prob}\{\text{Case1}\}$ は、前章より

$$\text{Prob}\{\text{Case1}\} = \frac{(P_u - P_d)P_d^{M-1}(1 - P_u)^{M-2}}{P_u^M(1 - P_d)^{M-1} - P_d^M(1 - P_u)^{M-1}} \quad (P_u \neq P_d) \quad (3.10a)$$

$$\text{Prob}\{\text{Case1}\} = \frac{1}{M - P_c} \quad (P_u = P_d = P_c) \quad (3.10b)$$

で与えられる。一方、事象 Case2 の起こる確率 $\text{Prob}\{\text{Case2}\}$ は事象 Case2 が事象 Case1 の補事象であることから

$$\text{Prob}\{\text{Case2}\} = 1 - \text{Prob}\{\text{Case1}\} \quad (3.11)$$

となる。

結局、1つのパケットを伝送するのに要するスロット数（実効サービス時間）の母関数 $G_{V, \text{TSAWM}}(z)$ 、平均 $m_{V, \text{TSAWM}}$ ならびに分散 $\sigma_{V, \text{TSAWM}}^2$ は、それぞれ、

$$\begin{aligned} G_{V, \text{TSAWM}}(z) &= G_{V1}(z) \text{Prob}\{\text{Case1}\} + G_{V2}(z) \text{Prob}\{\text{Case2}\} \\ &= \frac{P_d z^{D+1}}{1 - (1 - P_d)z^{D+1}} \left[\frac{(1 - z^{D+1})(P_u - 1)}{1 - (1 - P_u)z^{D+1}} \text{Prob}\{\text{Case1}\} + 1 \right] \end{aligned} \quad (3.12a)$$

$$m_{V, \text{TSAWM}} = \frac{(D+1)(1 - P_u)}{P_u} \text{Prob}\{\text{Case1}\} + \frac{D+1}{P_d} \quad (3.12b)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{V, \text{TSAWM}}^2 &= \frac{\{(D+1)^2(1 - P_u) \text{Prob}\{\text{Case1}\} [1 + (1 - P_u)(1 - \text{Prob}\{\text{Case1}\})]\}}{P_u^2} \\ &\quad + \frac{(D+1)^2(1 - P_d)}{P_d^2} \end{aligned} \quad (3.12c)$$

で与えられる。

バッファサイズが1個の場合は、# n がダウンリンクで成功したとき # $n+1$ はアップリンクに存在し、バッファサイズが2個以上の場合の Case 1 におけるパケット位置よりも $D+1$ スロットだけ経過した位置から伝送され始める。従って、Case 1 の確率を1とし、式(3.12a)の母関数に z^{D+1} を乗じ、式(3.12b)の平均に $D+1$ を加えるとバッファサイズ=1に対する実効サービス時間の母関数、平均、分散を求めることができる。

パケットの伝送開始時点から地上送信局が ACK を受信するまでの時間 T_t の母関数 $G_{T_t}(z)$ ならびに平均 m_{T_t} は、それぞれ、

$$G_{T_t}(z) = G_{V_1}(z)z^D \quad (3.13a)$$

$$m_{T_t} = \frac{(D+1)(P_u + P_d)}{P_u P_d} \quad (3.13b)$$

となる。従って、式(3.12)と式(3.13)を式(3.2)～(3.5)に代入すると、タンデム型の伝送遅延分布の母関数 $G_{T,TSAWM}(z)$ ならびに平均 $m_{T,TSAWM}$ が求められる。

また、式(3.12)において $P_d=1$ (あるいは $P_u=1$) とし、 D を $2D$ とすると、

$$G_{V,TSAWM}(z) = \frac{P_u z^{2D+1}}{1 - (1 - P_u)z^{2D+1}} \quad (3.14a)$$

$$m_{V,TSAWM} = \frac{2D+1}{P_u} \quad (3.14b)$$

$$\sigma_{V,TSAWM}^2 = \frac{(1 - P_u)(2D+1)^2}{P_u^2} \quad (3.14c)$$

となり、中継再送用バッファをもたない標準型の遅延特性式に一致していることがわかる。

3.4 タンデム型 Stop-and-Wait A R Q方式の平均伝送遅延特性

本節では、パケットの到着過程が平均 λ であるポアソン到着[42]-[46]の場合の平均伝送遅延特性について考察する。

図 3.1 にラウンドトリップ伝搬遅延 $D=64$ 、 $P_u=P_d=P_c$ の場合のパケットの平均伝送遅延を示す。

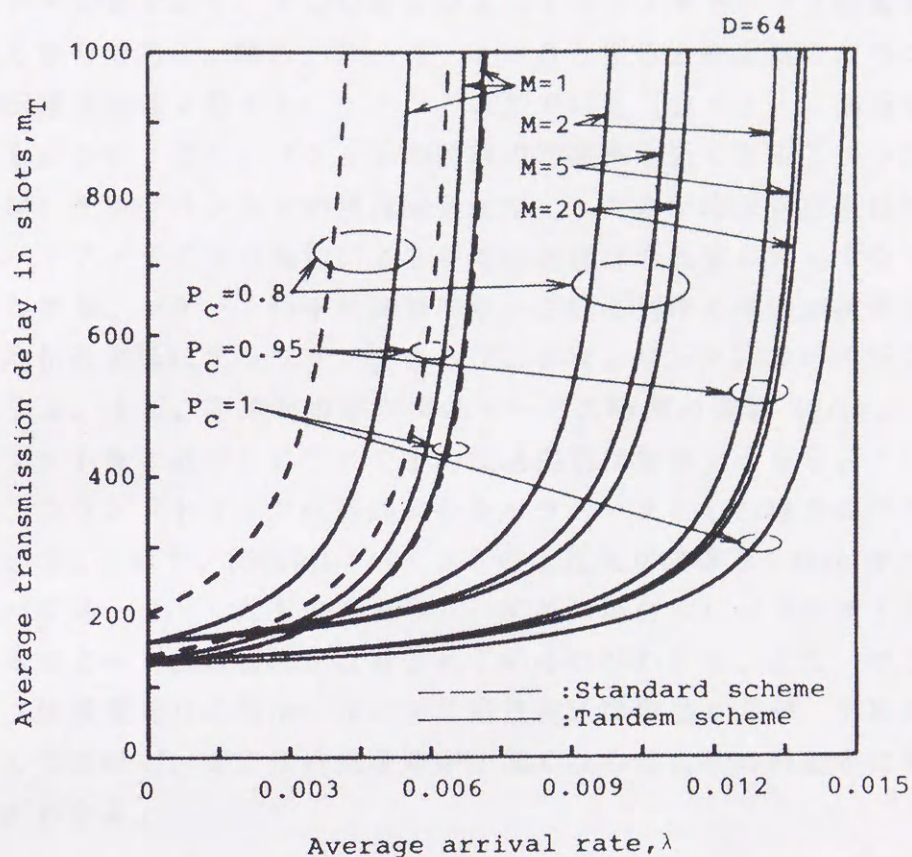
図 3.1 タンデム型 Stop-and-Wait ARQ 方式の遅延特性 ($P_u=P_d=P_c$)

Fig.3.1 Average transmission delay of tandem Stop-and-Wait ARQ scheme with a Poisson arrival for $P_u=P_d=P_c$.

この図より、タンデム型は標準型より優れていることがわかる。また、バッファサイズが大きくなるほど、遅延特性が改善されている。改善される理由としては次のように考えられる。バッファサイズが1個の場合、# n がダウンリンクで成功したとき、# $n+1$ は常に地上送信局に存在し、# n がバッファから消去されるまで格納されるチャンスはない。それに対して、バッファサイズを複数個にすると、# n のダウンリンクでの成功如何にかかわらず、# $n+1$ を中継再送用バッファに格納することができ、ラ

ラウンドトリップ伝搬遅延が縮小されるためである。しかし、パケットの伝送成功確率が非常に高くトラヒック負荷が少ない場合には、標準型の方が優れている。その理由は、タンデム型では衛星がパケットを受信するのに1スロット必要であり、そのためにかえってラウンドトリップ伝搬遅延が増加するからである。即ち、 $P_c \rightarrow 1$, $\lambda \rightarrow 0$ とすると標準型のラウンドトリップ伝搬遅延は $2D + 1$ に、タンデム型では $2(D + 1)$ に漸近することからもわかる。また、パケットの伝送成功確率が低くなるとアップリンクならびにダウンリンクでの再送回数が増えるため平均伝送遅延は増加するが、バッファサイズの増加による平均伝送遅延の改善は著しくなっていくのがわかる。パケットの平均到着率が小さいと列待ち遅延が減少するため、平均伝送遅延はアップリンクならびにダウンリンクにおける伝送遅延に依存する。また、平均到着率が実効サービス時間の逆数 ($1/m_v$)、即ちスループット値に近づくにつれて平均伝送遅延は無限大となる。

次に、ラウンドトリップ伝搬遅延 D をパラメータとした場合の平均伝送遅延を図 3.2 に示す。同図(a)はパケットの伝送成功確率を、(b)は平均到着率 λ をパラメータとしたものである。いずれの場合もバッファサイズが大きくなるほど平均伝送遅延が改善されているのがわかる。また、ラウンドトリップ伝搬遅延 D の増加に伴い平均伝送遅延は増加するが、平均到着率が大きくなるほど、また伝送成功確率が低くなるほどその増加率は著しくなるのがわかる。

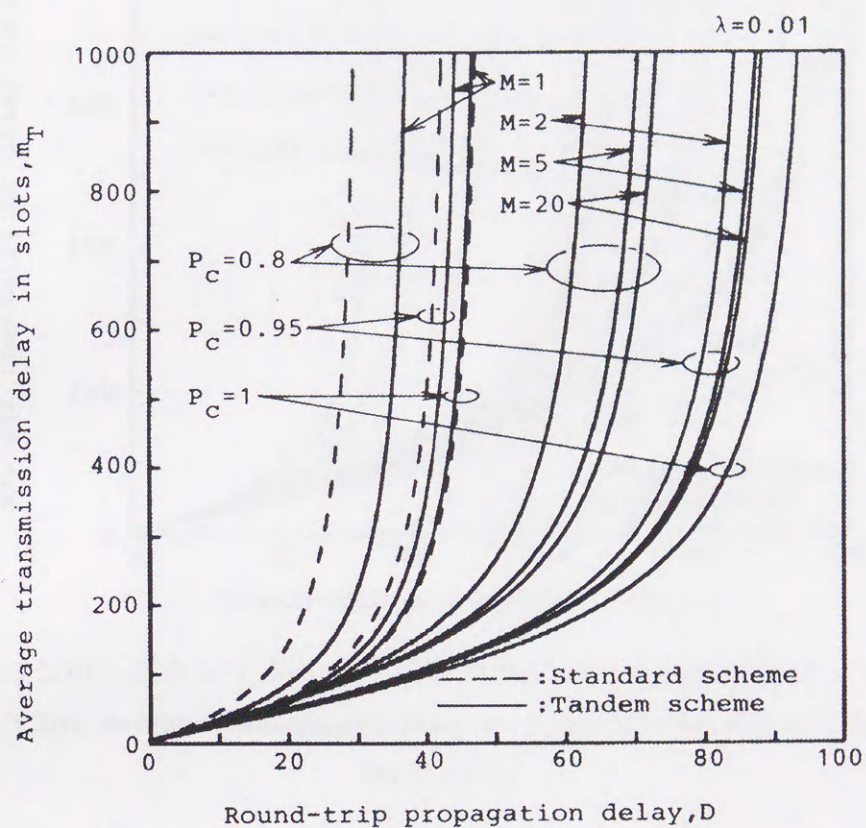


図 3.2(a) ラウンドトリップ伝搬遅延に対する遅延特性 ($\lambda = 0.01$)

Fig.3.2(a) Average transmission delay vs. round-trip propagation delay
for $\lambda = 0.01$.

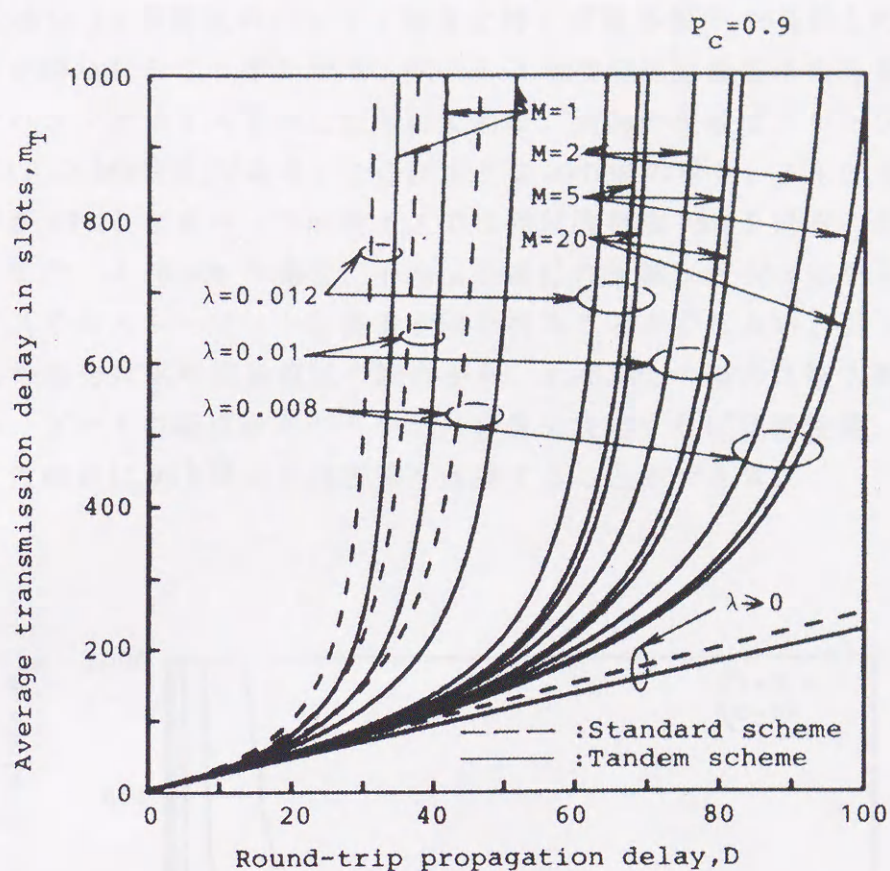
図 3.2(b) ラウンドトリップ伝搬遅延に対する遅延特性($P_c=0.9$)Fig.3.2(b) Average transmission delay vs. round-trip propagation delay
for $P_c=0.9$.

図 3.3 はバッファサイズ M をパラメータとした場合の平均伝送遅延である。 $P_c=1$ の場合はバッファサイズを増やしても平均伝送遅延は当然変化しないが、伝送成功確率が低くなるとバッファリング効果が表れている。このように、中継再送用バッファを設けたタンデム型の平均伝送遅延は標準型に比べてパケットの伝送成功確率が低く、トラヒック負荷が大きいほど優れていることがわかる。

次に、平均伝送遅延の改善限界を与えるバッファサイズが無限大の平均伝送遅延 T_∞ に対する比

$$\gamma_T = \frac{T_\infty}{T} \quad (3.15)$$

を遅延改善率と定義する。図 3.4 はバッファサイズ M と遅延改善率の関係を示したものである。同図より λ を 0.01 とすると、 P_c が 0.95 の場合 3 個、

0.85 の場合 10 個程度のバッファ容量を持てば限界値の 95%以上の平均伝送遅延が得られることがわかる。図 3.5 は 95%の遅延改善率を得るために必要なバッファサイズを示したものである。同図の破線はスループットの改善率(式(2.26)参照)である。この図より $\lambda=0.008$ の場合、スループットの改善率が 95%となるバッファサイズでは遅延改善率 95%を得ることができない。また、 $\lambda=0.006$ の場合、平均伝送遅延の改善率が 95%となるバッファサイズではスループット改善率 95%を得ることができない。従って、 $\lambda=0.008$ の場合は平均伝送遅延の観点から、 $\lambda=0.006$ の場合は第 2 章で示したスループットの観点からバッファの容量を決定すれば遅延性能、スループット性能共に 95%以上の改善率を達成することができる。

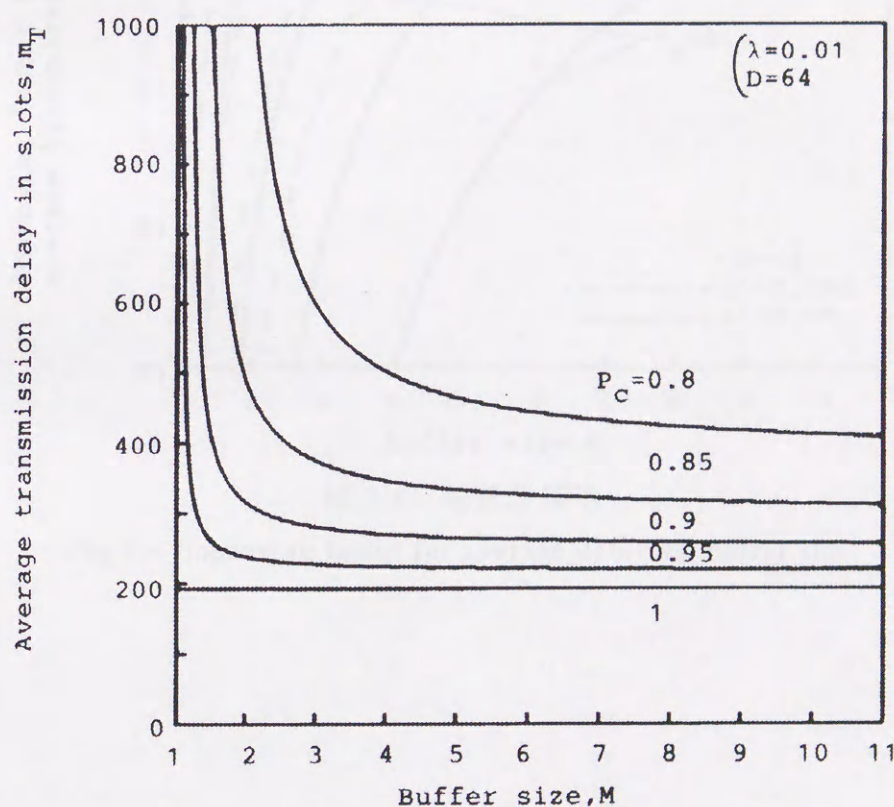


図 3.3 バッファサイズに対する遅延特性

Fig.3.3 Average transmission delay vs. buffer size.

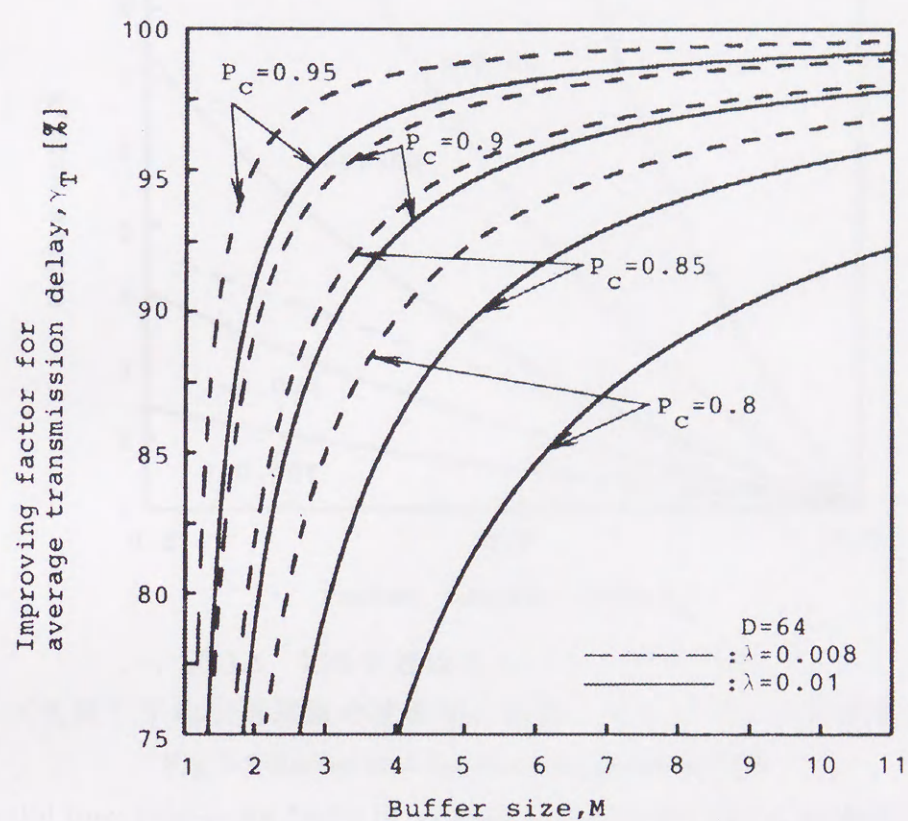


図 3.4 遅延改善率

Fig.3.4 Improving factor for average delay vs. buffer size.

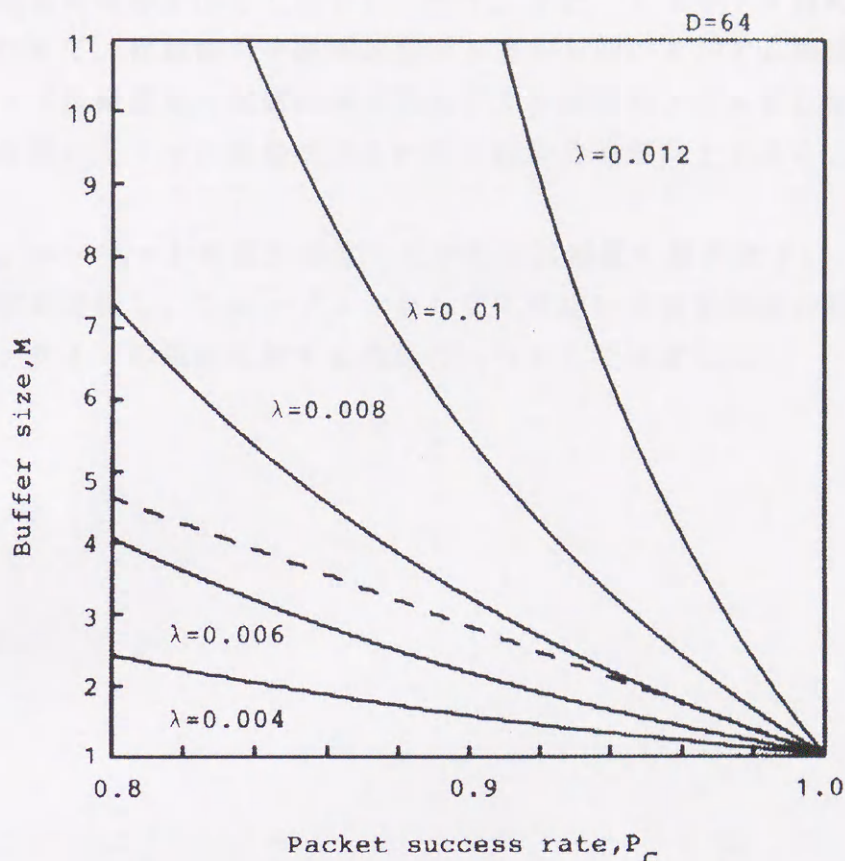


図 3.5 95%を達成するバッファサイズ
(実線：平均伝送遅延の改善率、破線：スループット改善率)

Fig.3.5 Buffer size for improving factor 95%
(solid line; improving factor of average transmission delay, dashed line;
improving factor of throughput).

3.5 結 言

本章では有限容量の中継再送用バッファをもつタンデム型の Stop-and-Wait A R Q方式について、その伝送遅延の母関数を導出することにより中継ノードにおけるバッファリングが平均伝送遅延に与える影響について考察した。その結果、タンデム方式では、衛星がパケットを受信するのに時間（1スロット）を要するために、パケットの伝送成功確率が非常に高い場合にはかえってラウンドトリップ伝搬遅延が増加する。しかし、パケッ

トの伝送成功確率が小さくなるにつれて、また、トラヒック負荷が大きくなるにつれて、複数個の中継再送用バッファを持つタンデム型は、ラウンドトリップ伝搬遅延の実質的減少効果により標準型よりも常に優れており、中継再送用バッファの容量が大きいほど遅延性能が向上することが示された。

また、バッファを無限大用意した平均伝送遅延の限界値 T_{∞} に対して遅延改善率を定義し、スループットならびに平均伝送遅延性能の観点からのバッファサイズの設計に対する指針の一つとして提案した。

第 4 章 タンデム型 Go-back-N A R Q 方式のスループット特性

4.1 序 言

Go-back-N A R Q 方式ではラウンドトリップ伝搬遅延の間、確認信号を受信すること無く（つまりアウトスタンディングとして）連続的にパケットを順番に送り続ける。1 ラウンドトリップ伝搬遅延の後に確認信号を受信し、それがもしも再送要求（NACK）信号であればそれに対応するパケットから順番に再送する方式である。この方式ではパケットが連続的に送出されるため、パケット誤り率が低い場合には性能が改善されるので広く用いられている。

本章では、スループットの性能向上のためにラウンドトリップ伝搬遅延を実質的に短縮させることが可能なタンデム型 Go-back-N A R Q 方式について考察する。タンデム型 Go-back-N A R Q 方式は、例えば衛星通信システムで衛星を中継局とし、そこに誤り検出、バッファリング、再送要求ならびに再送機能を装備し、地上送信局－衛星間、衛星－地上受信局間のリンクにそれぞれ Go-back-N 方式を適用するものである。まず、4.2 で標準型 Go-back-N A R Q 方式における伝送プロトコルとスループット解析について概説する。次に 4.3 でタンデム型 Go-back-N A R Q 方式における伝送プロトコルを述べた後、スループットを表す厳密式を導出する。その結果を用いて、4.4 で中継再送用バッファの効果ならびにスループット特性について論じ、タンデム型は標準型に比べて常に優れた特性をもつことを示している。

4.2 標準型 Go-back-N ARQ方式

4.2.1 伝送プロトコル

標準型 Go-back-N ARQ方式の伝送プロトコルは以下のように記述することができる。まず、地上送信局は衛星を介して連続的に地上受信局に向けてパケットを送信し、そのコピーを再送用バッファに格納する。1 ラウンドトリップ伝搬遅延の後、地上受信局からの確認信号が ACK であれば、それに対応するコピーをバッファから消去し、次の新しいパケットを送出する。もしも NACK であれば、それに対応するパケットに戻って再送用バッファからそれらのコピーを連続的に再送する。地上受信局ではパケットの誤り判定を行い、正しければそれを受理し、ACK を返送する。もし誤りが検出されればそれを廃棄し、NACK を返送する（図 4.1 参照）。

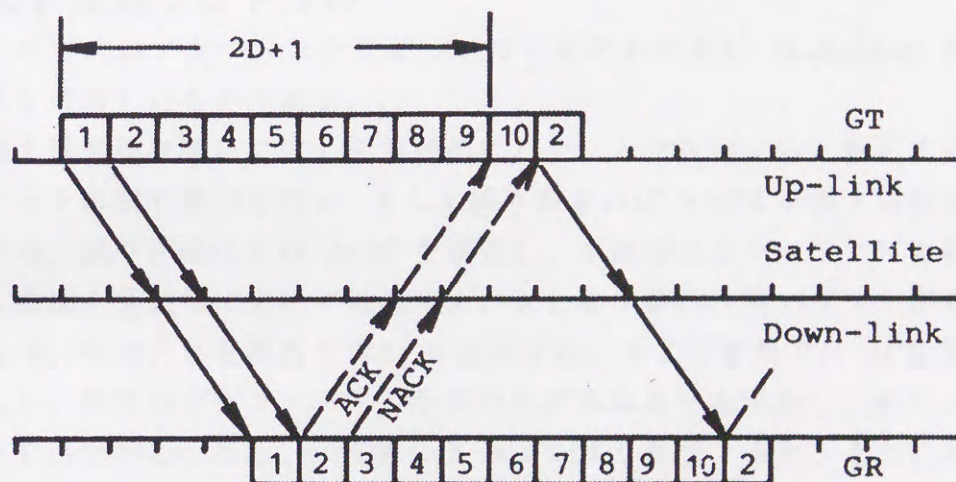


図 4.1 標準型 Go-back-N ARQ 方式

Fig.4.1 Standard Go-back-N ARQ scheme.

4.2.2 スループット解析

本方式のスループットは、Stop-and-Wait ARQ方式の場合と同様の仮定の下に解析される。この方式では、任意のパケットが地上受信局において受理されたとき、次のパケットは受信され始める時点にあることに注意する。そこで、任意のパケットが地上受信局に受理されてから、次のパケッ

トが受理されるまでに要する平均スロット数 $E[\beta]$ は、パケットの伝送成功がアップリンクで成功しかつダウンリンクで成功したときに限られ、それ以外の場合は再送が起こることを考慮すれば、

$$E[\beta] = 1 + (2D+1) \frac{1 - P_u P_d}{P_u P_d} \quad (4.1)$$

で与えられる。従って、標準型 Go-back-N A R Q方式のスループット η は $E[\beta]$ の逆数

$$\eta = \frac{1}{E[\beta]} \quad (4.2)$$

で与えられる。

4.3 タンデム型 Go-back-N A R Q方式

4.3.1 伝送プロトコル

この方式はアップリンクとダウンリンクそれぞれに Go-back-N A R Q方式を適用したものである。

地上送信局は衛星に対して連続的にパケットを送出する。衛星受信機はパケットの誤り検出を行い、もしも誤りがあれば NACK を地上送信局に返送する。誤りが無ければ ACK を返送し、中継再送用バッファに格納し、直ちに地上受信局に向けて送出的る。もしも中継再送用バッファが満杯であれば、受け入れを拒否し REJ を返送する。地上送信局では ACK を受信すると、再送用バッファからそれに対応するコピーを消去し、新しいパケットを送出する。また、NACK あるいは REJ を受信すると、それに対応したパケットにまで戻り、再送用バッファから連続的に再送する。一方、地上受信局では受信したパケットの誤り検出を行い、誤りがあれば NACK を衛星に返送する。誤りが無ければそれを受理し、ACK を返送する。衛星は NACK を受信すると中継再送用バッファからそれに対応したパケットに戻って連続的に再送する。ACK を受信するとそれに対応したパケットを中継再送用バッファから消去する。

パケットに誤りの生じない理想的な環境では中継再送用バッファ容量として $D+1$ 個あればパケットが円滑に流れていくので (図 4.2)、ここではこの場合について考察する。

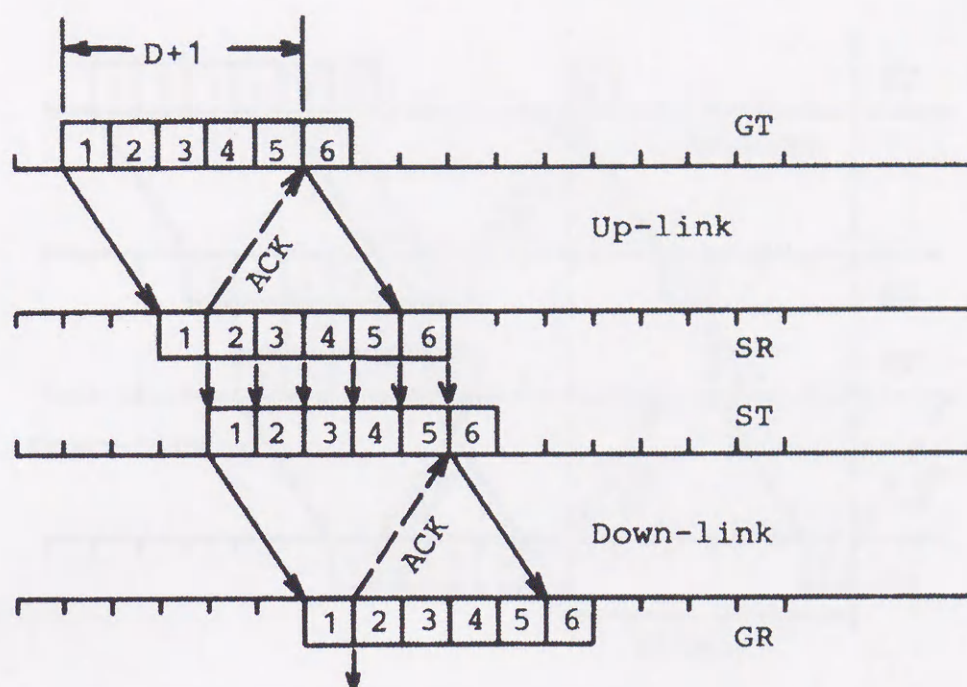


図 4.2 タンデム型 Go-back-N ARQ 方式

Fig.4.2 Tandem Go-back-N ARQ scheme.

4.3.2 スループット解析

任意の packets ($\#n$) がダウンリンクで成功してからそれに続く packets ($\#n+1$) が成功するまでに要する平均スロット数を求める。図 4.4 に示すように packets $\#n$ と packets $\#n+1$ は連続的に送出されるため、 $\#n$ が成功したときの $\#n+1$ の位置は、もし $\#n+1$ がアップリンクで成功していれば地上受信局で受信され始める時点にある（このとき、 $\#n+1$ は中継再送用バッファに格納されている）。もしも $\#n+1$ がアップリンクで不成功であれば、地上送信局で再送され始める時点にある（このとき、 $\#n+1$ は中継再送用バッファに格納されていない）（図 4.3）。後者を Case1、前者を Case2 とする。

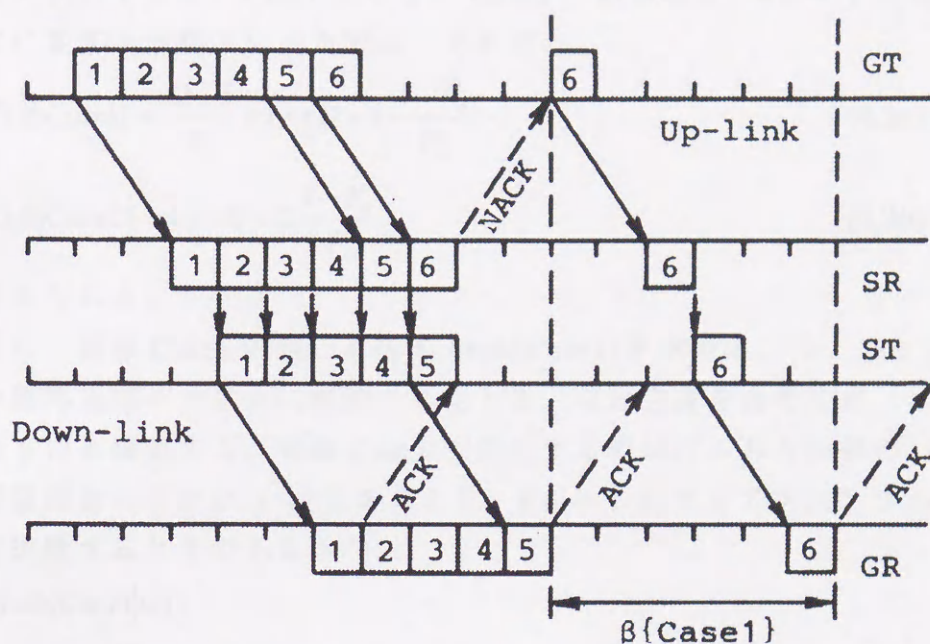


図 4.3 事象 Case1

Fig.4.3 Event "Case1".

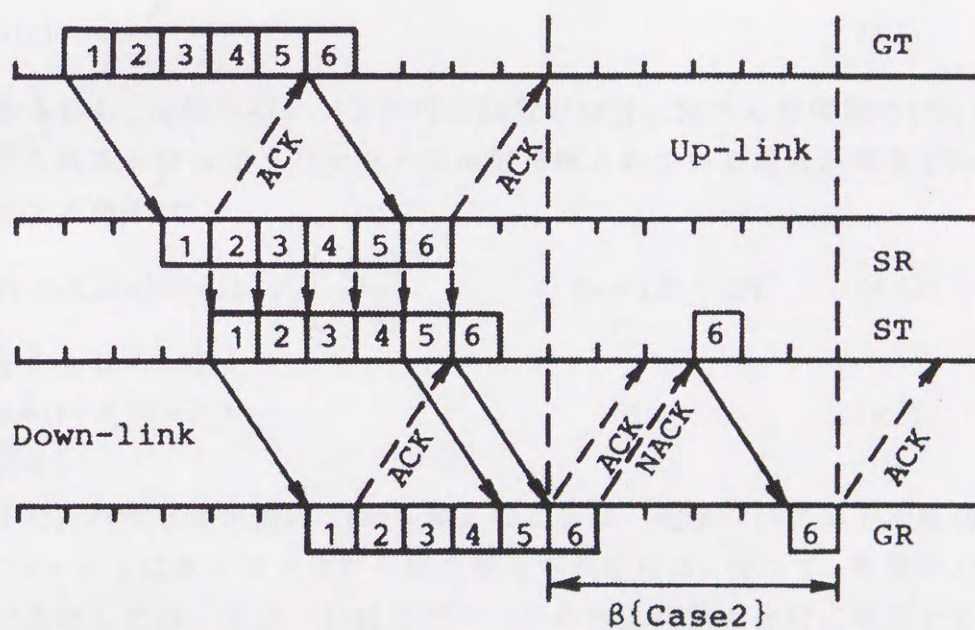


図 4.4 事象 Case2

Fig.4.4 Event "Case2".

これに注目すれば、Case1 ならびに Case2 にある場合、#n + 1 が成功するまでに要する平均スロット数は、それぞれ、

$$E\{\beta|Case1\} = \frac{D+1}{P_u} + 1 + (D+1) \frac{1-P_d}{P_d} \quad (4.3a)$$

$$E\{\beta|Case2\} = 1 + (D+1) \frac{1-P_d}{P_d} \quad (4.3b)$$

で与えられる。

次に、事象 Case1 の起こる確率 $\text{Prob}\{Case1\}$ を求める。今、パケット #n が中継再送用バッファに格納されたとき、自分自身を含めて m ($\leq D$) 個あるものと仮定する。事象 Case1 が発生するのは、これら m 個のパケットの再送回数の合計が i 回であるとき、#n + 1 がアップリンクで $i+1$ 回伝送に失敗するときであるから、

$$\begin{aligned} \text{Prob}\{Case1|m\} &= \sum_{i=0}^{\infty} \{m \text{ 個のパケットの再送回数合計} = i\} \\ &\quad \cdot \text{Prob}\{\#n+1 \text{ のアップリンクでの失敗回数} = i+1\} \end{aligned} \quad (4.4)$$

となる。1 つのパケットの再送回数に関する確率母関数 $S(z)$ は

$$S(z) = \frac{P_d}{1-z(1-P_d)} \quad (4.5)$$

であるから、 m 個のパケットの再送回数の合計に関する母関数は $\{S(z)\}^m$ で与えられる。従って、バッファに m 個格納されている場合、事象 Case1 の発生する確率は

$$\text{Prob}\{Case1|m\} = (1-P_u) \left[\frac{P_d}{1-x} \right]^m \quad (m=1,2,\dots,D) \quad (4.6a)$$

で与えられる。但し、

$$x = (1-P_u)(1-P_d) \quad (4.7)$$

である。

また、バッファが満杯 ($D+1$ 個) のときは、先頭のパケットが成功するまで #n + 1 はバッファ受け入れを拒否され続ける。従って、先頭のパケットが成功した後、後続の D 個のパケットの再送回数の合計に依存することになる点を考慮すれば、

$$\text{Prob}\{Case1|D+1\} = (1-P_u) \left[\frac{P_d}{1-x} \right]^D \quad (4.6b)$$

となる。以上の考察により、事象 Case1 の発生する確率は

$$\text{Prob}\{\text{Case1}\} = (1 - P_u) P \left[\frac{P_d}{1-x} \right] \quad (4.8)$$

で与えられる。但し、

$$P(z) = \sum_{m=1}^D P_m z^m + P_{D+1} z^D \quad (4.9)$$

であり、 P_m はパケットが中継再送用バッファに入ったとき m 個のパケットがバッファに格納されている確率であると定義する。そこで、確率 P_m を求めるための状態遷移確率を導出する。

今、 $\#n$ が中継再送用バッファに入ったとき、自分自身を含めて m 個のパケットが蓄積されていたと仮定する。但し、 $m \leq D$ とする。このとき、 $\#n+1$ はこのバッファに格納可能であるから、 $\#n+1$ の再送中に既にバッファ内にあるパケットが成功する分だけ減少することになる。従って、 $\#n+1$ の再送が i 回であるとき、 k 個のパケットが伝送に成功する確率 $\text{Prob}\{k|i\}$ は

$$\text{Prob}\{k|i\} = \frac{(k+i-1)!}{(i-1)!k!} P_d^k (1-P_d)^i \quad (i \geq 0, k = 1, 2, \dots, m-1) \quad (4.10)$$

$$\text{Prob}\{m|i\} = P_d^m \sum_{j=1}^i \frac{(m+j-2)!}{(j-1)!(m-1)!} (1-P_d)^{j-1} \quad (4.11)$$

で与えられる。これらの結果を用いると、 $\#n$ が成功したとき m 個蓄積されていた状態から、 $\#n+1$ が成功したとき $m-k+1$ 個蓄積されている遷移確率 $P[m-k+1|m]$ は、 k 個のパケットが伝送に成功すればよいから、式(4.12a)で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} P[1|m] &= (1-P_u) \left[\frac{P_d}{1-x} \right]^m = e_m \\ P[m-k+1|m] &= \frac{P_u x}{1-x} \left[\frac{P_d}{1-x} \right]^k = a_k \\ &\quad (k = 1, 2, \dots, m-1, \quad m = 1, 2, \dots, D) \\ P[m+1|m] &= \frac{P_u}{1-x} = a_0 \end{aligned} \right\} \quad (4.12a)$$

また、 $m = D+1$ の場合、 $\#n+1$ が中継再送用バッファに格納される可能性があるのは、バッファ内の先頭のパケットが成功してからであることに注意しなければならない。従って、この点に考慮すれば、式(4.12b)が得られる。

$$\left. \begin{aligned} P[1|D+1] &= e_D \\ P[D-k+1|D+1] &= a_k \quad (k=1,2,\dots,D-1) \\ P[D+1|D+1] &= a_0 \end{aligned} \right\} \quad (4.12b)$$

式(4.12)を基に状態方程式をたてると、

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= P_1 e_1 + P_2 e_2 + P_3 e_3 + \cdots + P_D e_D + P_{D+1} e_D \\ P_2 &= P_1 a_0 + P_2 a_1 + P_3 a_2 + \cdots + P_D a_{D-1} + P_{D+1} a_{D-1} \\ P_3 &= P_2 a_0 + P_3 a_1 + \cdots + P_D a_{D-2} + P_{D+1} a_{D-2} \\ &\vdots \\ P_D &= \cdots + P_D a_1 + P_{D+1} a_1 \\ P_{D+1} &= P_D a_0 + P_{D+1} a_0 \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$

となる。

状態方程式(4.13)を式(4.9)を用いて解くと、

$$P(z) = \frac{B(z)}{A(z)} \quad (4.14)$$

$$B(z) = z\{(1-x)z - P_d\} \left[\frac{P_u y}{1-x} z^{D-1} - \mathbf{P} \left[\frac{P_d}{1-x} \right] \frac{P_d(1-P_u)}{(1-x)z - P_d} \right] \quad (4.15)$$

$$A(z) = P_u z - P_d \quad (4.16)$$

となる。但し、 $y = P_D + P_{D+1}$ である。

$P(1)=1$ であることから、式(4.14)に $z=1$ を代入すると

$$\mathbf{P} \left[\frac{P_d}{1-x} \right] (1-x)P_d(1-P_u) = P_u^2(1-P_d)y + (1-x)(P_d - P_u) \quad (4.17)$$

を得る。次に、関数 $P(z)$ は正則であるので、 $P(z)$ の分母=0 なる点 $z=z_0$ において分子=0 とならなければならない。従って、式(4.15)より

$$y = \mathbf{P} \left[\frac{P_d}{1-x} \right] \frac{1-x}{P_d} \left(\frac{P_u}{P_d} \right)^{D-1} \quad (4.18)$$

を得る。結局、式(4.17)ならびに式(4.18)より確率 $P[P_d/(1-x)]$ は式(4.19a)で与えられる。

$$P \left[\frac{P_d}{1-x} \right] = \frac{(P_d - P_u) P_d^D}{(1 - P_u) P_d^{D+1} - (1 - P_d) P_u^{D+1}} \quad (P_u \neq P_d) \quad (4.19a)$$

また、 $P_u=P_d=P_c$ のとき、 $P(z)$ は

$$\mathbf{P}(z) = \frac{z\{(2-P_c)z-1\}}{z-1} \left[\frac{y}{2-P_c} z^{D-1} - \frac{1-P_c}{z(2-P_c)-1} \mathbf{P} \left[\frac{P_c}{1-x} \right] \right] \quad (4.20)$$

$P(1)=1$ より、L'Hospital の定理を用いると、式(4.21)が得られる。

$$P \left[\frac{P_c}{1-x} \right] (2-P_c)^2 + (D-1)(1-P_c)y = 2-P_c \quad (4.21)$$

また、 $z=1$ なる点において $P(z)$ は正則であることから、

$$y = P \left[\frac{P_c}{1-x} \right] (2-P_c) \quad (4.22)$$

を得る。式(4.21)ならびに(4.22)より式(4.19b)が得られる。

$$P \left[\frac{P_d}{1-x} \right] = \frac{1}{D(1-P_c)+1} \quad (P_u = P_d = P_c) \quad (4.19b)$$

式(4.19)を式(4.8)に代入すると、

$$\text{Prob}\{\text{Case1}\} = \frac{(1-P_u)(P_d-P_u)P_d^D}{(1-P_u)P_d^{D+1} - (1-P_d)P_u^{D+1}} \quad (P_u \neq P_d) \quad (4.23a)$$

$$\text{Prob}\{\text{Case1}\} = \frac{1-P_c}{D(1-P_c)+1} \quad (P_u = P_d = P_c) \quad (4.23b)$$

が得られる。

一方、事象 Case2 は事象 Case1 の補事象であることから、

$$\text{Prob}\{\text{Case2}\} = 1 - \text{Prob}\{\text{Case1}\} \quad (4.24)$$

である。結局、任意の packets 1 つを伝送するのに要する平均スロット数 $E[\beta]$ は

$$E[\beta] = \frac{D+1}{P_u} \left[\frac{(1-P_u)(P_d-P_u)P_d^D}{(1-P_u)P_d^{D+1} - (1-P_d)P_u^{D+1}} \right] + 1 + (D+1) \frac{1-P_d}{P_d} \quad (P_u \neq P_d) \quad (4.25a)$$

$$E[\beta] = \frac{D+1}{P_u} \left[\frac{1-P_c}{D(1-P_c)+1} \right] + 1 + (D+1) \frac{1-P_c}{P_c} \quad (P_u = P_d = P_c) \quad (4.25b)$$

で与えられる。

更に $P_d=1$ の場合、式(4.25a)より $E[\beta]$ は

$$E[\beta] = 1 + (D+1) \frac{1-P_u}{P_u} \quad (4.26)$$

となる。この場合、ダウンリンクにおいて packets は常に伝送に成功するので、システムの性能はアップリンクによってのみ支配される。同様に、 $P_u=1$ の場合も $E[\beta]$ は

$$E[\beta] = 1 + (D+1) \frac{1-P_d}{P_d} \quad (4.27)$$

となる。この場合は、アップリンクにおいてパケットは常に伝送に成功するので $\text{Prob}\{\text{Case1}\}=0$ となり、システムの性能はダウンリンクによってのみ支配される。

また、 $P_d=P_u=1$ のときは式(4.25b)より、 $E[\beta]=1$ となることは明らかである。

4.4 スループット特性

標準型ならびにタンデム型 Go-back-N A R Q 方式のスループット特性を図 4.5 に示す。これはラウンドトリップ伝搬遅延 $D=64$ の場合で、 $P_u=P_d$ について描いている。横軸はダウンリンクにおけるパケット誤り率 $(1-P_d)$ である。図より、タンデム型の方が標準型に比べて常に優れていることがわかる。また、Mase *et al.* の近似式[36]も同図に示している。

次に、アップリンクでの伝送成功確率 P_u をパラメータとしたスループット特性を図 4.6 に示す。図より、 P_u が小さくなるにつれて、スループットが減少してゆくことがわかる。これはアップリンクで再送が頻繁に行われるためである。

図 4.7 はラウンドトリップ伝搬遅延によるスループットの変化を示したもので、伝搬遅延が短いほどスループットが高いという本来の性質を見ることができる。

このように、中継再送用バッファを設けたタンデム型 Go-back-N A R Q 方式は、衛星を単なる中継器とする標準型 Go-back-N A R Q 方式に比べて、スループット性能は常に優れていることが示されている。

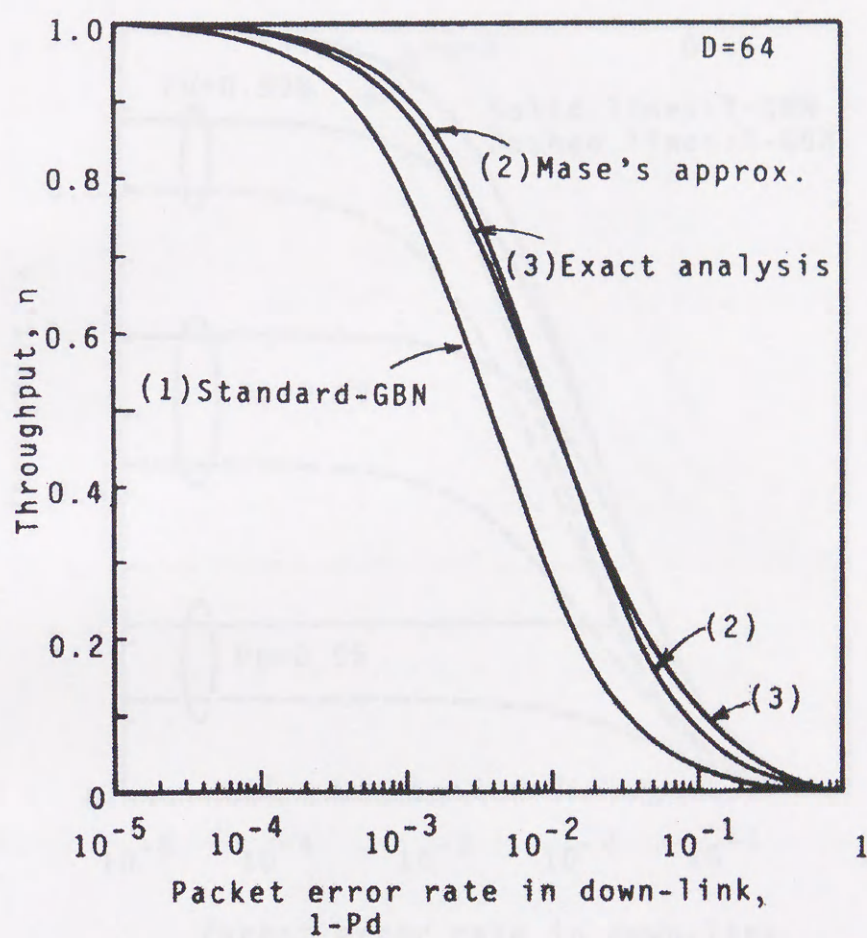


図 4.5 スループット特性の比較

Fig.4.5 Throughput performance of tandem Go-back-N ARQ scheme
in the case of $P_u=P_d$.

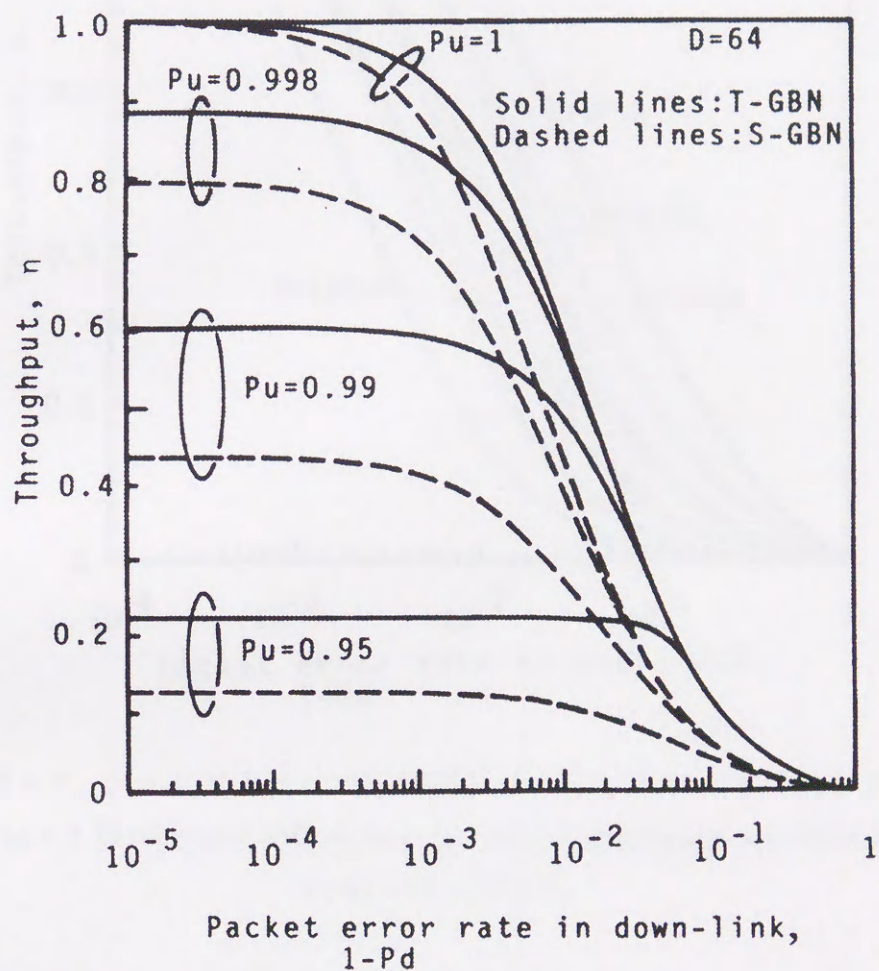


図 4.6 標準型とタンデム型 Go-back-N ARQ 方式のスループット特性

Fig.4.6 Throughput performance of tandem- and standard-GBN ARQ scheme.

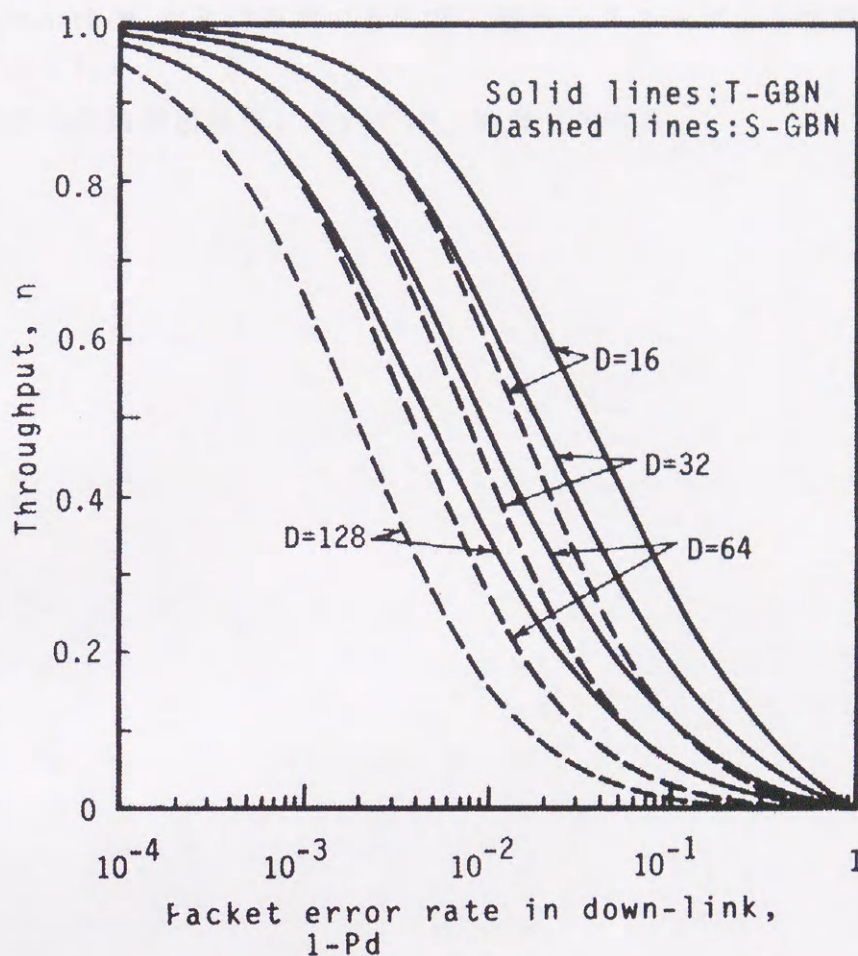


図 4.7 ラウンドトリップ伝搬遅延によるスループットの変化

Fig.4.7 Throughput with respect to round-trip propagation delay D
in the case of $P_u=P_d$.

4.5 結 言

本章では、ラウンドトリップ伝搬遅延を実質的に短縮する効果を持たせることのできるタンデム型誤り検出自動再送要求方式として、Go-back-N ARQ方式をとりあげ、そのスループットについて考察した。タンデム型 Go-back-N ARQ方式では衛星に中継用バッファが導入されるので、このバッファの影響を考慮したスループットの厳密式を求めた。その結果を用

本方式の伝送遅延特性については、次章で述べる。

第 5 章 タンデム型 Go-back-N A R Q 方式の伝送遅延特性

5.1 序 言

本章ではタンデム型 Go-back-N A R Q 方式の伝送遅延特性について考察する。まず、5.2 において標準型 Go-back-N A R Q 方式の伝送遅延の導出手法について概説する。5.3 では、これをタンデム型に適用し、その伝送遅延の母関数を導出する。これを用いてパケットの平均伝送遅延を求める。その解析結果を用いて平均伝送遅延特性に対するアップリンクならびにダウンリンクの伝送成功確率の影響などを 5.4 で論ずる。その結果、タンデム型 Go-back-N A R Q 方式の性能は標準型 Go-back-N A R Q 方式に比べて優れていることが明白に示される。

5.2 標準型 Go-back-N A R Q 方式の伝送遅延解析

遅延解析に際する仮定としては、第 3 章の Stop-and-Wait A R Q 方式における仮定と同じである。

標準型 Go-back-N A R Q 方式の実効サービス時間分布の母関数 $G_{V,SGBN}(z)$ 、平均 $m_{V,SGBN}$ ならびに分散 $\sigma_{V,SGBN}^2$ は、それぞれ、

$$G_{V,SGBN}(z) = \frac{P_u P_d z}{1 - (1 - P_u P_d) z^{2D+1}} \quad (5.1a)$$

$$\begin{aligned}
 m_{V,SGBN} &= \left. \frac{dG_{V,SGBN}(z)}{dz} \right|_{z=1} \\
 &= 1 + (2D+1) \frac{1-P_u P_d}{P_u P_d}
 \end{aligned} \quad (5.1b)$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_{V,SGBN}^2 &= \left. \frac{d^2 G_{V,SGBN}(z)}{dz^2} \right|_{z=1} + m_{V,SGBN} - m_{V,SGBN}^2 \\
 &= \frac{(1-P_u P_d)(2D+1)^2}{P_u^2 P_d^2}
 \end{aligned} \quad (5.1c)$$

で与えられる。また、パケットが回線を伝送されて受理され、地上送信局が ACK を受信するまでの時間 T_t の母関数 $G_{T_t}(z)$ ならびにその平均 m_{T_t} は、それぞれ、

$$\begin{aligned}
 G_{T_t}(z) &= \frac{P_u P_d z^{2D+1}}{1 - (1 - P_u P_d) z^{2D+1}} \\
 &= G_V(z) z^{2D}
 \end{aligned} \quad (5.2a)$$

$$m_{T_t} = m_{V,SGBN} + 2D \quad (5.2b)$$

で与えられる。これらの式を式(3.2)ならびに(3.3)に代入すると、標準型 Go-back-N ARQ 方式の伝送遅延分布の母関数 $G_{T,SGBN}(z)$ ならびに平均 $m_{T,SGBN}$ が求められる。

5.3 タンデム型 Go-back-N ARQ方式の伝送遅延解析

本節では、スループットの場合と同様に、パケットに誤りの生じない理想的な環境では中継再送用バッファ容量として $D+1$ 個あればパケットが円滑に流れていくので、この場合の遅延特性について考察する。

タンデム型 Go-back-N ARQ 方式の遅延解析は次の点を留意すれば、前節で述べた標準型に対する手法が適用でき、パケットの伝送遅延は式(3.1),(3.2)で与えられる。また、実効列待ち時間はパケットの実効サービス時間を用いて式(3.4),(3.5)で与えられる。タンデム型 Go-back-N ARQ 方式の実効サービス時間は、任意のパケット(#n)がダウンリンクで成功してからそれに続くパケット(#n+1)が成功するまでに経過する平均スロット数で

ある。第4章の図4.3に示すように、パケット#5とパケット#6とは連続的に送出されるため、#5が成功したときの#6の位置は、もし#6がアップリンクで不成功であれば地上送信局で再送され始める時点にある。また、図4.4に示すように、もし#6がアップリンクで成功していれば地上受信局で受信され始める時点にある（このとき、#6は中継再送用バッファに格納されている）。第4章と同様に、前者をCase1、後者をCase2とする。これに注目すれば、Case1ならびにCase2にある場合、パケット#5が成功してから#6が成功するまでに要するスロット数の母関数 $G_{V1}(z)$ ならびに $G_{V2}(z)$ は

$$G_{V1}(z) = \frac{P_u P_d z^{D+2}}{\{1 - (1 - P_u)z^{D+1}\} \{1 - (1 - P_d)z^{D+1}\}} \quad (5.3a)$$

$$G_{V2}(z) = \frac{P_d z}{1 - (1 - P_d)z^{D+1}} \quad (5.3b)$$

で与えられる。事象 Case1 の発生する確率 $\text{Prob}\{\text{Case1}\}$ は、前章の式(4.23a),(4.23b)より

$$\text{Prob}\{\text{Case1}\} = \frac{(1 - P_u)(P_d - P_u)P_d^D}{(1 - P_u)P_d^{D+1} - (1 - P_d)P_u^{D+1}} \quad (P_u \neq P_d) \quad (5.4a)$$

$$\text{Prob}\{\text{Case1}\} = \frac{1 - P_c}{D(1 - P_c) + 1} \quad (P_u = P_d = P_c) \quad (5.4b)$$

で与えられる。一方、事象 Case2 は事象 Case1 の補事象であることから、

$$\text{Prob}\{\text{Case2}\} = 1 - \text{Prob}\{\text{Case1}\} \quad (5.5)$$

である。結局、任意のパケット1つを伝送するのに要するスロット数の母関数 $G_{V,TGBN}(z)$ 、平均 $m_{V,TGBN}$ ならびに分散 $\sigma_{V,TGBN}^2$ は、それぞれ、

$$G_{V,TGBN}(z) = \frac{P_d z^D}{1 - (1 - P_d)z^{D+1}} \left[\frac{z^{D+1} - 1}{1 - (1 - P_u)z^{D+1}} \text{Prob}\{\text{Case1}\} + 1 \right] \quad (5.6a)$$

$$m_{V,TGBN} = \frac{D+1}{P_u} \text{Prob}\{\text{Case1}\} + 1 + (D+1) \frac{1 - P_d}{P_d} \quad (5.6b)$$

$$\sigma_{V,TGBN}^2 = \frac{(D+1)^2 \text{Prob}\{\text{Case1}\} (2 - P_u - \text{Prob}\{\text{Case1}\})}{P_u^2} + \frac{(D+1)^2 (1 - P_d)}{P_d^2} \quad (5.6c)$$

で与えられる。また、パケットが回線上を伝送されて受理され、地上送信局がACKを受信するまでの時間は、式(5.3a)と地上受信局から地上送信局までのACKの返送に要する時間Dで与えられることから、その母関数と

平均は、それぞれ、

$$G_{T,TGBN}(z) = G_{V1}(z)z^D \quad (5.7a)$$

$$m_{T,TGBN} = \frac{(D+1)(P_u + P_d)}{P_u P_d} \quad (5.7b)$$

与えられる。これらの式を式(3.2)ならびに(3.3)に代入すると、タンデム型 Go-back-N A R Q方式の伝送遅延分布の母関数 $G_{T,TGBN}(z)$ ならびにその平均 $m_{T,TGBN}$ をそれぞれ求めることができる。

特にパケットの平均到着率 $m_A \rightarrow 0$ のとき、平均伝送遅延は $m_{T,TGBN} \rightarrow m_{T1,TGBN}$ となり、アップリンクでの伝送、ダウンリンクでの伝送ならびに ACK の返送から成ることがわかる。また、パケット平均到着率 m_A が $m_A \rightarrow 1/m_{V,TGBN}$ になるにつれてパケットの平均伝送遅延は、 $m_{T,TGBN} \rightarrow \infty$ となる。従って、このシステムのスループットは $1/m_{V,TGBN}$ で与えられることになり、前章の結果と一致することがわかる。更に、 $P_u=1$ または $P_d=1$ のときは、それぞれダウンリンクまたはアップリンクにおける伝送ならびに再送による遅延を受けることも明らかである。

5.4 タンデム型 Go-back-N A R Q方式の平均伝送遅延特性

本節では、標準型ならびにタンデム型 Go-back-N A R Q方式の平均伝送遅延特性を示すために、パケットの到着過程を平均 λ のポアソン分布の場合について考察する。図 5.1 にパケットの平均伝送遅延を示す。これはラウンドトリップ伝搬遅延 $D=64$ の場合で、 $P_d=P_u=P_c$ の場合について描いたものである。タンデム型の方が標準型に比べて優れて改善されていることがわかる。しかし、図から読み取ることができないが、タンデム型ではラウンドトリップ伝搬遅延が 1 スロットだけ増加するため、負荷トラヒックが少ない場合にはこの影響が現れ、標準型 Go-back-N A R Q方式の平均伝送遅延の方が優れていることを注意しておく。

次に、アップリンクでの伝送成功確率 P_u をパラメータとした平均伝送遅延特性を図 5.2 に示す。 P_u が小さくなるにつれて、更に P_d が小さくなるにつれて (図 5.2b)、平均伝送遅延が増大してゆく。これはアップリンク、

更にはダウンリンクでの再送が頻繁に行われるためである。

図 5.3 はラウンドトリップ伝搬遅延 D が平均伝送遅延に与える影響について示したものである。同図(a)はパケット誤り率を固定して平均到着率 λ をパラメータとしている。更に同図(b)は平均到着率 λ を固定してパケット誤り率をパラメータとしている。いずれの場合にもラウンドトリップ伝搬遅延の増加に対して平均伝送遅延は、指数関数的に増加することがわかる。このように、中継再送用バッファを設けたタンデム型 Go-back-N ARQ 方式は、衛星を単なる中継器とする標準型 Go-back-N ARQ 方式に比べてスループット性能は常に優れているが、平均伝送遅延はトラヒック負荷が大きい場合に優れていることがわかる。

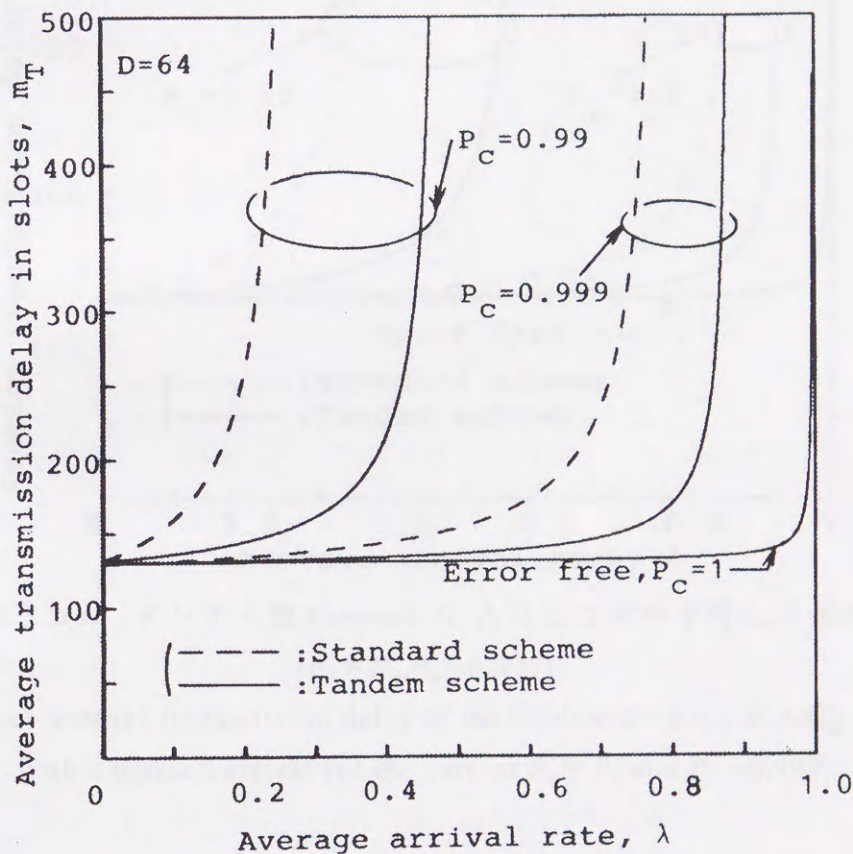


図 5.1 タンデム型 Go-back-N ARQ 方式の平均伝送遅延 ($P_d=P_u=P_c$)

Fig.5.1 Average transmission delay of the tandem Go-back-N ARQ scheme with a poisson arrival for the case of $P_d=P_u=P_c$.

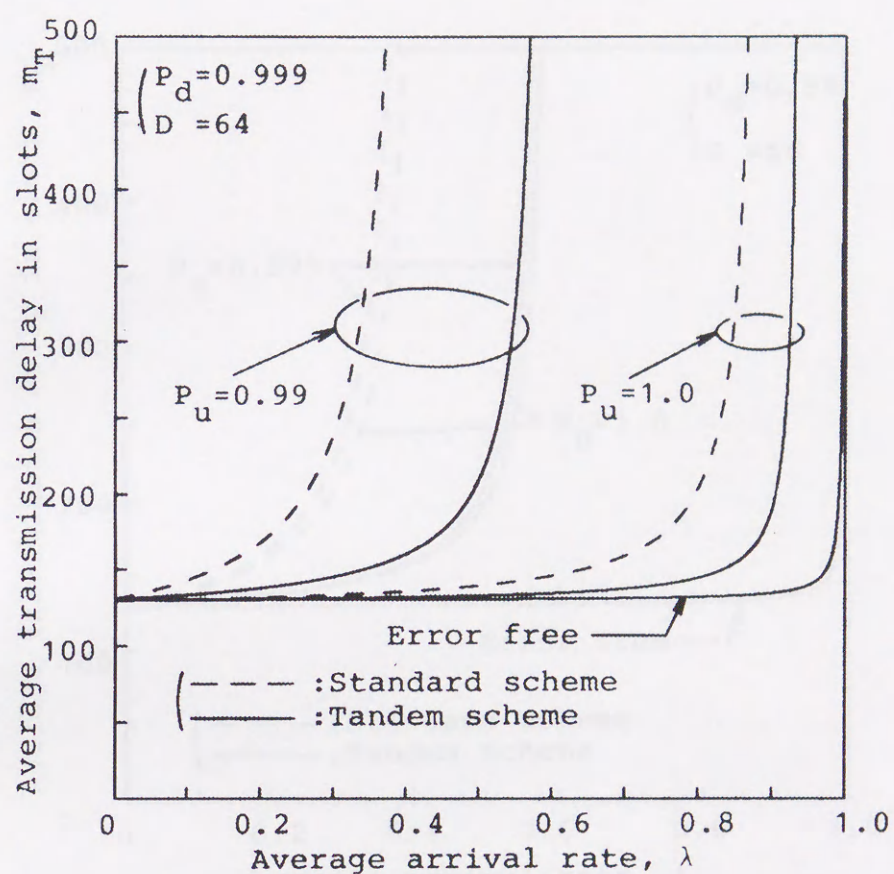


図 5.2(a) タンデム型 Go-back-N ARQ 方式の平均伝送遅延
($P_d \neq P_u, P_d = 0.999$)

Fig.5.2(a) Average transmission delay of the tandem Go-back-N ARQ scheme with a poisson arrival for the case of $P_d \neq P_u$ and $P_d = 0.999$.

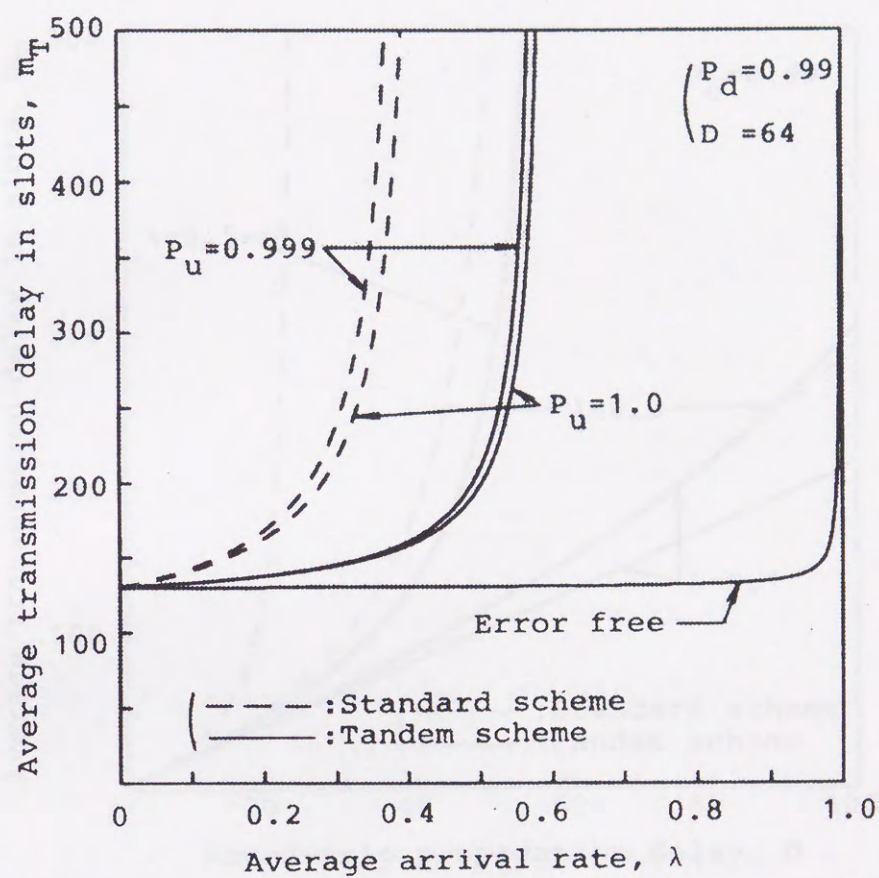


図 5.2(b) タンデム型 Go-back-N ARQ 方式の平均伝送遅延
($P_d \neq P_u, P_d = 0.99$)

Fig.5.2(b) Average transmission delay of the tandem Go-back-N ARQ scheme with a poisson arrival for the case of $P_d \neq P_u$ and $P_d = 0.99$.

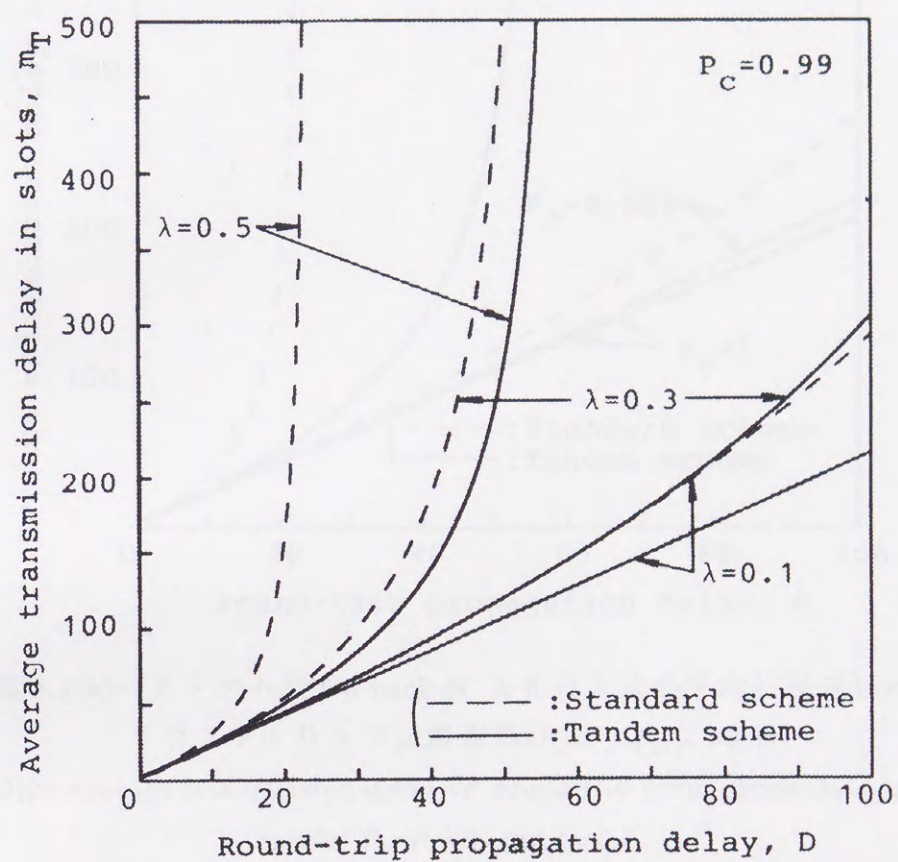


図 5.3(a) タンデム型 Go-back-N A R Q 方式の平均伝送遅延対ラウンドトリップ伝搬遅延 ($P_d=P_u=P_c=0.99$)

Fig.5.3(a) Average transmission delay vs. round-trip propagation delay for the case of $P_d=P_u=P_c=0.99$.

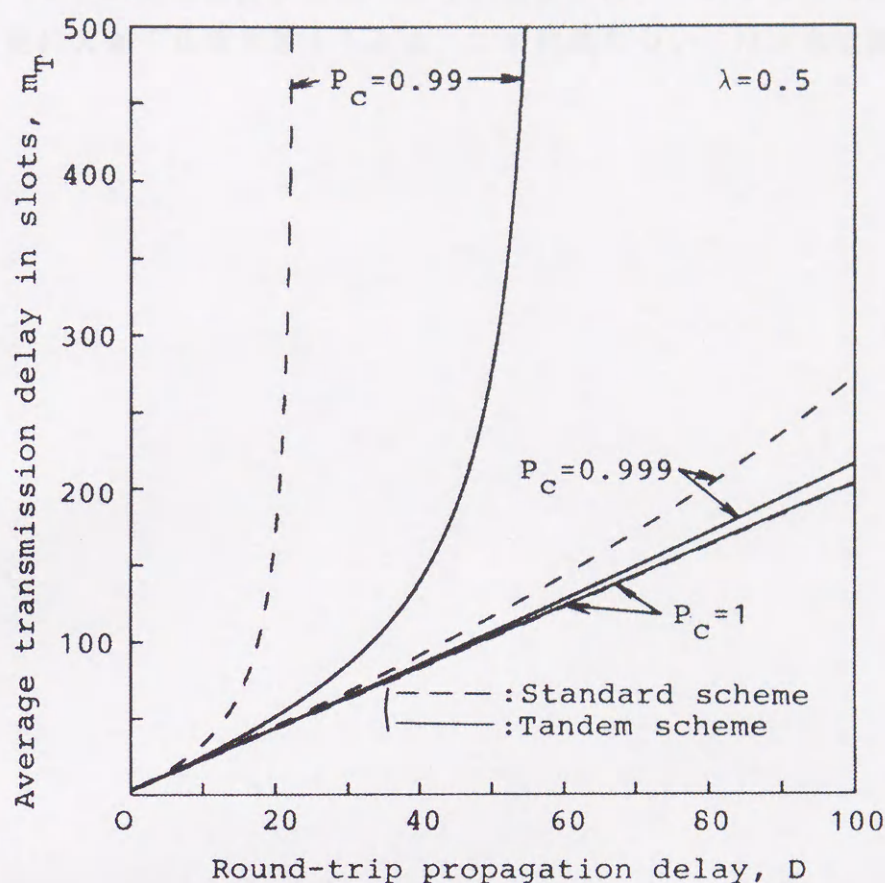


図 5.3(b) タンデム型 Go-back-N ARQ 方式の平均伝送遅延対
ラウンドトリップ伝搬遅延 ($P_d=P_u=P_c$, $\lambda=0.5$)

Fig.5.3(b) Average transmission delay vs. round-trip propagation delay for the case of $P_d=P_u=P_c$ and $\lambda=0.5$.

5.5 結 言

本章では、リンクレベルにおけるラウンドトリップ伝搬遅延を実質的に短縮する効果をもたせることのできるタンデム型 Go-back-N ARQ 方式の伝送遅延特性について考察し、その特性は標準型に比べておおむね優れた性能をもっていることを示した。しかし、トラフィック負荷が小さい場合には中継ノードにおいてパケットを受信するために必要な 1 スロット分だけラウンドトリップ伝搬遅延の増加による影響が現れることがわかった。

中継ノードでの処理時間が無視できない場合には、このシステムに与える影響は更に大きくなると考えられる。この問題については次章で論ずる。

第 6 章 ノード処理時間を考慮した タンデム型 Go-back-N A R Q 方式の トラヒック特性

6.1 序 言

これまでの考察では衛星や受信局でのパケットの処理時間を無視しており、このノード処理時間がスループット特性や平均伝送遅延特性に与える影響についての考察はこれまで行われていない。

本章では、タンデム型 Go-back-N A R Q 方式において衛星や地上受信局でのノード処理時間を考慮した場合のスループット特性と平均伝送遅延特性について考察する。まず、6.2 においてノード処理時間を考慮した標準型 Go-back-N A R Q 方式の伝送プロトコルについて述べた後、伝送遅延とスループットの導出について概説する。6.3 では、ノード処理時間を考慮したタンデム型について、その伝送プロトコルを概説した後、標準型の場合の遅延導出手法を適用して、本方式の伝送遅延の母関数を導出する。スループットはこの母関数を使って求める。平均伝送遅延については、パケットが地上受信局で受理された後の確認信号 (ACK) の返送方法の違いによる二つのプロトコルについて検討する。6.4 ではこれらの解析結果を用いて標準型とタンデム型の平均伝送遅延特性とスループット特性を比較検討する。また、スループット特性と平均伝送遅延特性に対するノード処理時間の影響についても論じ、スループット特性はノード処理時間を考慮してもタンデム型の方が標準型より常に優れていることを示す。しかし、平均伝送遅延特性に関しては、タンデム型と標準型にトレードオフが存在しており、その関係を明らかにしている。

6.2 標準型 Go-back-N ARQ方式

ノード処理時間を考慮した場合の標準型 Go-back-N ARQ方式における送信局と受信局の伝送プロトコルを次に示す。

6.2.1 伝送プロトコル

送信局は衛星を介して連続的に受信局に向けてパケットを送信し、そのコピーを再送用バッファに格納する。1 ラウンドトリップ伝搬遅延とノード処理時間を加えた時間の後、受信局から確認信号が送られてくる。確認信号が ACK であれば、それに対応するコピーを再送用バッファから消去し、次の新しいパケットを送出する。もしも再送要求信号 (NACK) であれば、再送用バッファに格納してあるそれに対応するパケットに戻って連続的に再送する。また、受信局では、パケットの誤り検出などのノード処理を行った後に、誤りがなければそれを受理し、ACK を衛星経由で送信局に返送する。もし誤りが検出されればそれを廃棄し、NACK を返送する (図 6.1)。

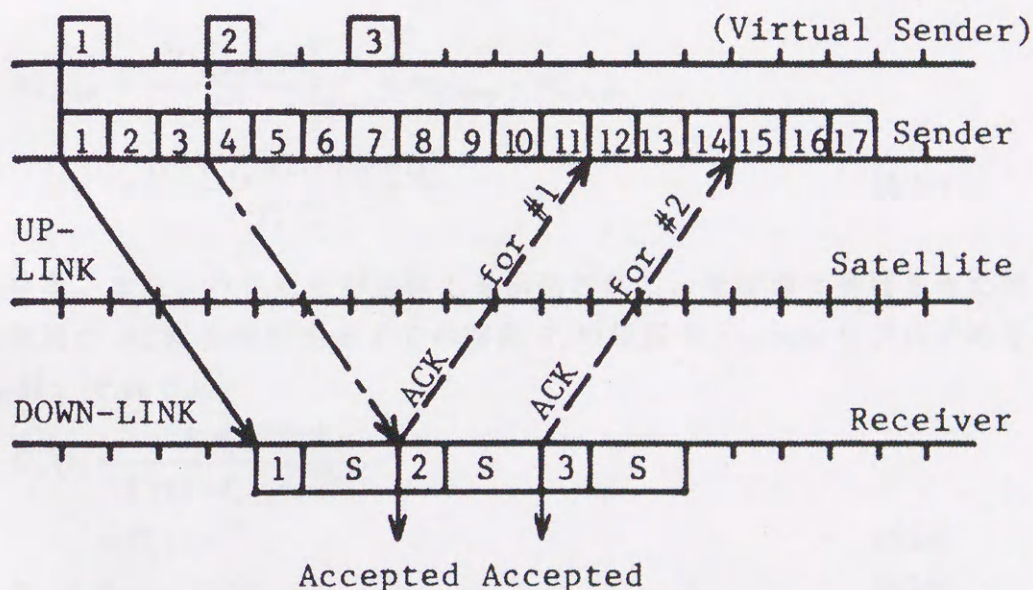


図 6.1 ノード処理時間を考慮した標準型 Go-back-N ARQ方式 ($D=4, S=2$)

Fig.6.1 Standard Go-back-N ARQ scheme with nodal processing time
for $D=4$ and $S=2$.

6.2.2 伝送遅延解析

ノード処理時間を考慮した場合の標準型 Go-back-N A R Q方式の伝送遅延解析とスループット解析は、ノード処理時間を考慮しない場合（第4章、第5章）と同じ仮定のもとでおこなう。ただし、受信局と中継局では、パケットに対する誤り検出などのノード処理にSスロットを費やすものとする。

ノード処理時間のある標準型 Go-back-N A R Q方式の実効サービス時間分布の母関数 $G_{V,SGBN}(z)$ 、平均 $m_{V,SGBN}$ ならびに分散 $\sigma_{V,SGBN}^2$ は、図 6.1 よりラウンドトリップ伝搬遅延がノード処理時間だけ増加すること、ならびに、パケットは送信局から実質的には処理時間間隔で送出されることと等価であることを考慮すれば、第4章ならびに第5章で用いられている導出手法を適用することができ、それぞれを求めると、

$$G_{V,SGBN}(z) = \frac{P_u P_d z^{S+1}}{1 - (1 - P_u P_d) z^{2D+S+1}} \quad (6.1a)$$

$$\begin{aligned} m_{V,SGBN} &= \left. \frac{dG_{V,SGBN}(z)}{dz} \right|_{z=1} \\ &= 1 + S + (2D + S + 1) \frac{1 - P_u P_d}{P_u P_d} \end{aligned} \quad (6.1b)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{V,SGBN}^2 &= \left. \frac{d^2 G_{V,SGBN}(z)}{dz^2} \right|_{z=1} + m_{V,SGBN}^2 - m_{V,SGBN}^2 \\ &= \frac{(1 - P_u P_d)(2D + S + 1)^2}{P_u^2 P_d^2} \end{aligned} \quad (6.1c)$$

となる。また、パケットが回線上を伝送されて、受信局で受理された後、送信局が ACK を受信するまでの時間 T_t の母関数 $G_{T_t}(z)$ ならびにその平均 m_{T_t} は、それぞれ、

$$\begin{aligned} G_{T_t}(z) &= \frac{P_u P_d z^{2D+1+S}}{1 - (1 - P_u P_d) z^{2D+1+S}} \\ &= G_V(z) z^{2D} \end{aligned} \quad (6.2a)$$

$$m_{T_t} = m_{V,SGBN} + 2D \quad (6.2b)$$

で与えられることは容易にわかる。

これらの式を式(3.2)ならびに(3.3)に代入するとノード処理時間を考慮した標準型 Go-back-N A R Q方式の伝送遅延の母関数 $G_{T,SGBN}(z)$ ならびに平均 $m_{T,SGBN}$ が求められる。

6.2.3 スループット解析

スループットは伝送すべきパケットを常に有するという条件のもとで、受信局において1つのパケットが受理された後、次のパケットが受理されるまでに要する平均スロット数 β の逆数で与えられる。これは式(3.2),(3.3),(6.1)においてパケットの平均伝送遅延 m_{Ti} が無限大に相当する状況下と等価である。このことから β は $m_{V,SGBN}$ で与えられることになる。従って、ノード処理時間のある標準型 Go-back-N A R Q方式のスループット η_{SGBN} は $m_{V,SGBN}$ の逆数、

$$\eta_{SGBN} = \frac{1}{m_{V,SGBN}} \quad (6.3)$$

で与えられる。

6.3 タンデム型 Go-back-N A R Q方式のトラヒック特性

6.3.1 伝送プロトコル

ノード処理時間のあるタンデム型 Go-back-N A R Q方式の伝送プロトコルを以下に示す(図6.2参照)。

送信局は衛星に対して連続的にパケットを送出する。衛星はパケットの誤り検出などのノード処理を行った後、誤りがなければ中継再送用バッファに格納し ACK を送信局に返送する。同時に受信局に向けてパケットを送出する。もしも中継再送用バッファが満杯であれば、受け入れを拒否し REJ なる確認信号を返送する。送信局では ACK を受信すると、再送用バッファからそれに対応するコピーを消去し、新しいパケットを送出する。また、NACK あるいは REJ を受信するとそれに対応したパケットにまで戻り、再送用バッファから連続的に再送する。一方、受信局では受信したパケットの誤り検出などのノード処理を行った後に、誤りがあれば NACK を衛星に返送する。衛星は NACK を受信するとそれに対応するパケットに戻って中継再送用バッファから連続的に再送する。ACK を受信するとそれに対応したパケットを中継再送用バッファから消去する。

受信局からの確認信号 ACK の返送方法により次の2通りが考えられる。その一つは、ACK を送信局まで返送することにより注目するパケットの伝

送終了とみなす方法（これをプロトコル T という）であり、もう一つは ACK を衛星までの返送で止める方法（これをプロトコル S という）がある。伝送遅延の解法から見るとプロトコル S はプロトコル T に比べて ACK の伝送遅延を $D/2$ だけ短縮したものである。

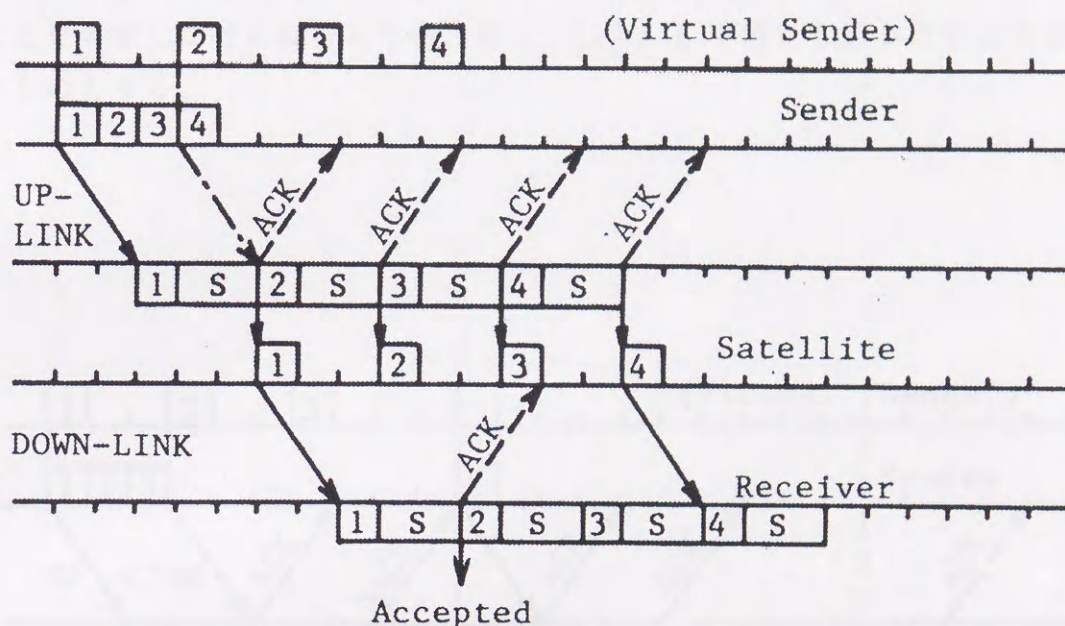


図 6.2 ノード処理時間を考慮したタンデム型 Go-back-N ARQ 方式
($D=4, S=2$)

Fig.6.2 Tandem Go-back-N ARQ scheme with nodal processing time
for $D=4$ and $S=2$.

6.3.2 伝送遅延解析

ノード処理時間のあるタンデム型 Go-back-N 方式の伝送遅延は、6.2.2 で述べた仮定のもとで式(3.1)～(3.3)で与えられる。また実効列待ち時間は、パケットの実効サービス時間を用いて式(3.4),(3.5)で与えられる。ここで、ノード処理時間のあるタンデム型 Go-back-N ARQ 方式の実効サービス時間は、伝送すべきパケットが常にあるという仮定のもとで任意のパケットがダウンリンクで成功してからそれに続くパケットが成功するまでに経過するスロット数として求められる。図 6.3(a)に示すように、パケット (#1) とパケット (#2) は連続的に送出されるため、#1 が成功したときの

#2の位置は、もし#2がアップリンクで不成功であれば送信局で再送され始める時点にある。これを Case1 とする。また、図 6.3(b)に示すように、もし#2がアップリンクで成功していれば受信局で受信され始める時点にある。これを Case2 とする。このことに着目すれば、第4章ならびに第5章で示された解析の手法を用いることができることがわかる。但し、ダウンリンク用の中継再送用バッファサイズは、 $1 + \lfloor D/(S+1) \rfloor = 1 + B$ 個であることを考慮しなければならない。但し、 $\lfloor x \rfloor$ は x を超える最小の整数を表すものとする。

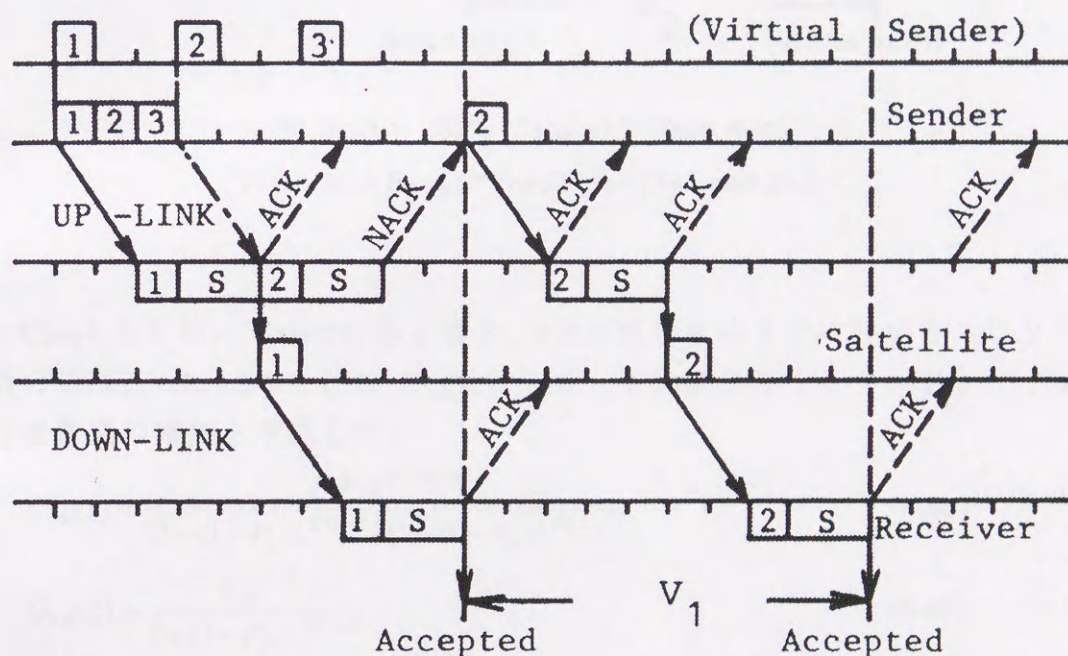
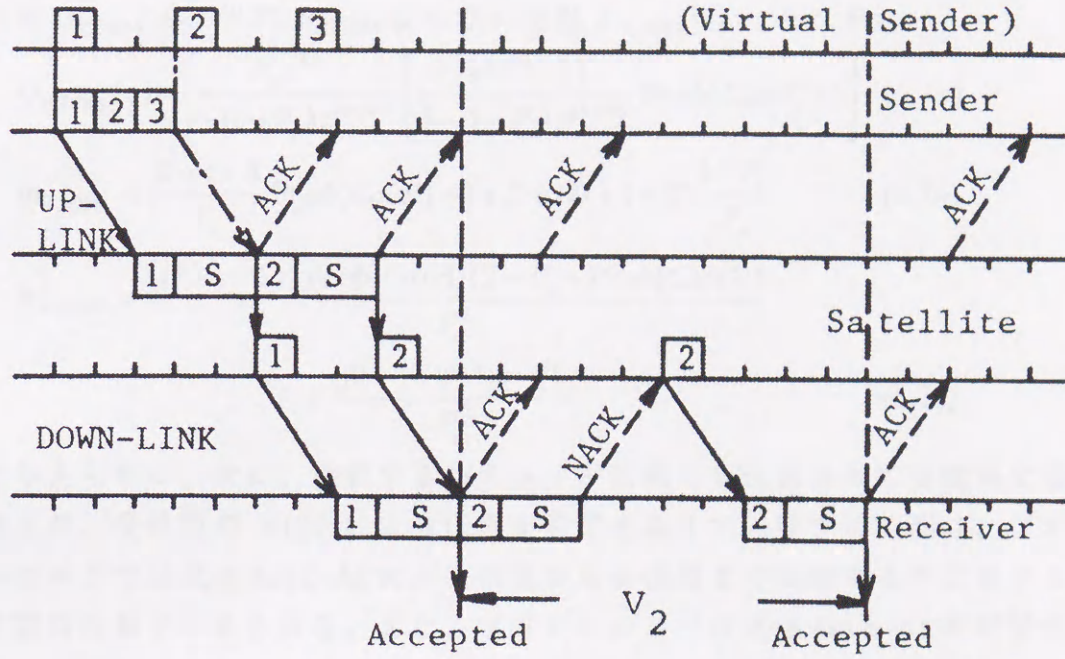


図 6.3(a) 事象 “Case1” ($D=4, S=2$)

Fig.6.3(a) Event “Case1” for $D=4$ and $S=2$.

図 6.3(b) 事象 “Case2” ($D=4, S=2$)Fig.6.3(b) Event “Case2” for $D=4$ and $S=2$.

Case1 ならびに Case2 にある場合、#2 が成功するまでに要するスロット数の母関数 $G_{V1}(z)$ ならびに $G_{V2}(z)$ は、ノード処理を伴うラウンドトリップ伝搬遅延の増加を考慮して、

$$G_{V1}(z) = \frac{P_u P_d z^{D+2S+2}}{\{1 - (1 - P_u)z^{D+S+1}\} \{1 - (1 - P_d)z^{D+S+1}\}} \quad (6.4a)$$

$$G_{V2}(z) = \frac{P_d z^{S+1}}{1 - (1 - P_d)z^{D+S+1}} \quad (6.4b)$$

で与えられる。また、事象 Case1 の発生する確率 $\text{Prob}\{\text{Case1}\}$ は

$$\text{Prob}\{\text{Case1}\} = \frac{(1 - P_u)(P_d - P_u)P_d^B}{(1 - P_u)P_d^{B+1} - (1 - P_d)P_u^{B+1}} \quad (P_u \neq P_d) \quad (6.5a)$$

$$\text{Prob}\{\text{Case1}\} = \frac{1 - P_c}{B(1 - P_c) + 1} \quad (P_u = P_d = P_c) \quad (6.5b)$$

で与えられる。但し、 $B = \lfloor D/(S+1) \rfloor$ である。事象 Case2 は、事象 Case1 の補事象であることから

$$\text{Prob}\{\text{Case2}\} = 1 - \text{Prob}\{\text{Case1}\} \quad (6.6)$$

である。結局、任意の packets 1 つを伝送するのに要するスロット数の母関数 $G_{V,TGBN}(z)$ 、平均 $m_{V,TGBN}$ ならびに分散 $\sigma_{V,TGBN}^2$ は、それぞれ、

$$G_{V,TGBN}(z) = \frac{P_d z^{S+1}}{1 - (1 - P_d) z^{D+1+S}} \left[\frac{z^{D+1+S} - 1}{1 - (1 - P_u) z^{D+1+S}} \text{Pr ob}\{Case1\} + 1 \right] \quad (6.7a)$$

$$m_{V,TGBN} = \frac{D+1+S}{P_u} \text{Pr ob}\{Case1\} + 1 + S + (D+1+S) \frac{1 - P_d}{P_d} \quad (6.7b)$$

$$\sigma_{V,TGBN}^2 = \frac{(D+1+S)^2 \text{Pr ob}\{Case1\} (2 - P_u - \text{Pr ob}\{Case1\})}{P_u^2} + \frac{(D+1+S)^2 (1 - P_d)}{P_d^2} \quad (6.7c)$$

で与えられる。次に、注目する packets が回線上を伝送されて受信局で受理され、受信局の ACK により伝送が終了するまでに要する時間は、プロトコル T では式(6.4a)と ACK が受信局から送信局まで伝搬するのに要する時間 D の和で与えられる。また、プロトコル S では式(6.4a)と ACK が受信局から衛星まで伝搬するのに要する時間 D/2 の和で与えられることから、その母関数と平均は、それぞれのプロトコルに対して

プロトコル T :

$$G_{T,TGBN,T}(z) = G_{V1}(z) z^D \quad (6.8a)$$

$$m_{T,TGBN,T} = \frac{(D+1+S)(P_u + P_d)}{P_u P_d} \quad (6.8b)$$

プロトコル S :

$$G_{T,TGBN,S}(z) = G_{V1}(z) z^{D/2} \quad (6.9a)$$

$$m_{T,TGBN,S} = \frac{(D+1+S)(P_u + P_d)}{P_u P_d} - \frac{D}{2} \quad (6.9b)$$

で与えられる。これらの式を式(3.2)ならびに(3.3)に代入することにより、ノード処理時間のあるタンデム型 Go-back-N A R Q方式の伝送遅延分布の母関数 $G_{T,TGBN}(z)$ ならびにその平均 $m_{T,TGBN}$ をそれぞれ求めることができる。

6.3.3 スループット解析

ノード処理時間のあるタンデム型 Go-back-N A R Q方式のスループット η_{TGBN} は、6.2.3 で述べたように、実効サービス時間の平均 $m_{V,TGBN}$ を用い

て

$$\eta_{TGBN} = \frac{1}{m_{V,TGBN}} \quad (6.10)$$

で与えられる。

6.4 標準型とタンデム型 Go-back-N A R Q方式との比較

本節では、ノード処理時間がある場合について標準型 Go-back-N A R Q方式とタンデム型 Go-back-N A R Q方式のスループットならびに平均伝送遅延特性を比較検討する。

まず、ラウンドトリップ伝搬遅延 $D=64$ で、アップリンクならびにダウンリンクでの伝送成功確率が等しい場合についてノード処理時間 S を $S=0$, $S=1$, $S=2$, $S=5$, $S=10$ と変化させたスループット特性を図 6.4 に示す。標準型、タンデム型いずれの方式でもスループットに対するノード処理時間 S が大きく影響することを示している。また、タンデム型 Go-back-N A R Q方式は、標準型より常に優れたスループット特性をもっていることが式 (6.3)ならびに式 (6.10)よりわかる。

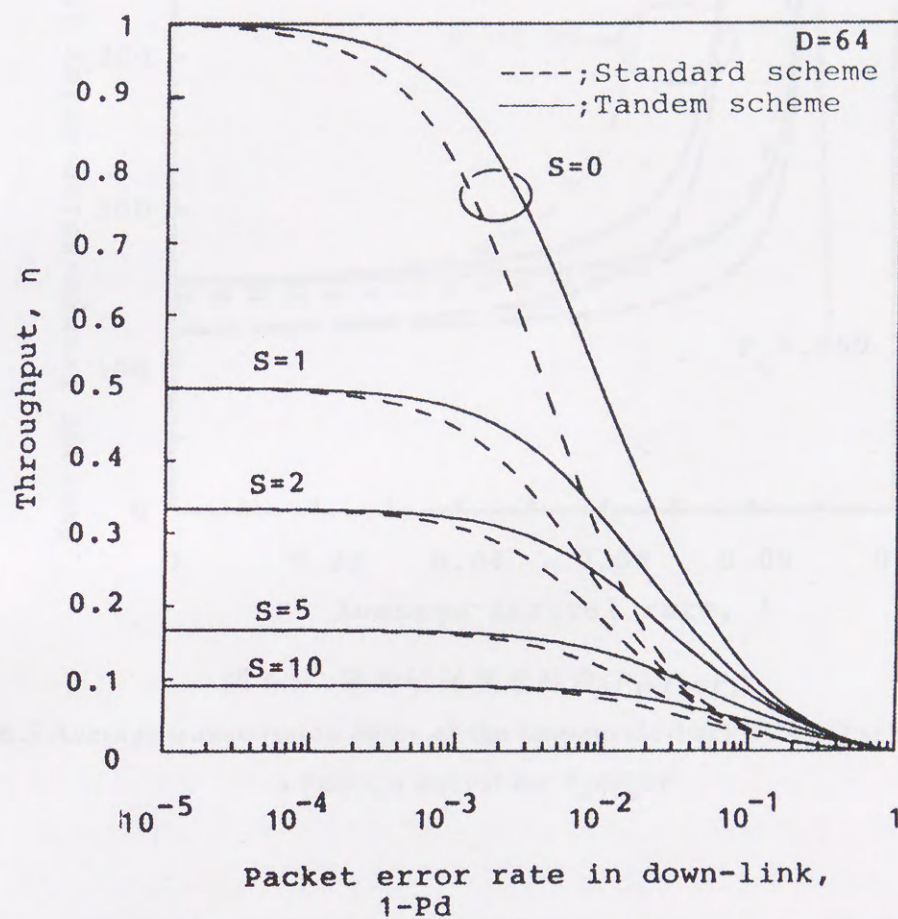


図 6.4 タンデム型と標準型のスループット特性 ($P_d=P_u=P_c$)

Fig.6.4 Throughput performance of tandem- and standard-Go-back-N ARQ scheme for $P_d=P_u=P_c$.

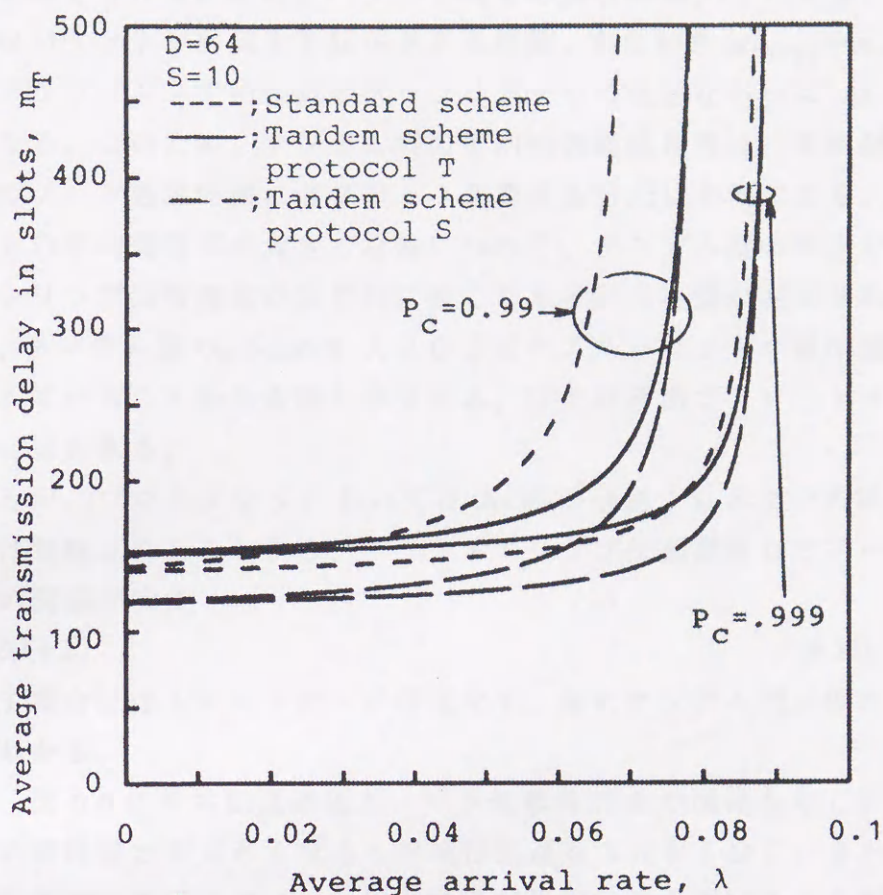
図 6.5 平均伝送遅延特性($P_d=P_u=P_c$)

Fig.6.5 Average transmission delay of the tandem Go-back-N ARQ scheme with a Poisson arrival for $P_d=P_u=P_c$.

次に、平均伝送遅延特性について考察する。パケットの到着過程が平均 λ のポアソン分布の場合を考える。図 6.5 はラウンドトリップ伝搬遅延 $D=64$ の場合で伝送成功確率 $P_d=P_u=P_c$ をパラメータとした平均伝送遅延特性を示している。 P_c が小さくなるにつれて平均伝送遅延が増大していく。平均伝送遅延特性にはプロトコル T とプロトコル S のいずれの場合も標準型とタンデム型にはトレードオフが存在することが図に示されている。また、 $P_d \neq P_u$ の場合も同様にトレードオフが存在する。トレードオフの存在する理由として次のようなことが挙げられる。パケットの到着が少なく、更にアップリンク、ダウンリンクでの伝送成功確率 P_u 、 P_d が高い場合、タンデム型 Go-back-N ARQ 方式は中継局となる衛星でのノード処理時間 S

の影響を強く受ける。特に、パケットの平均到着率 $m_A \rightarrow 0$ のとき、平均伝送遅延はパケットが回線上を伝送される時間、すなわち $m_{T,TGBN} \rightarrow m_{Tl,TGBN}$ となり、アップリンクでの伝送とダウンリンクでの伝送ならびに ACK の返送からなる。このため、タンデム型の平均伝送遅延特性は、標準型に比べ衛星でのノード処理時間に S スロットを要する分だけ不利になる。一方、パケットの平均到着率が大きくなるにつれて、タンデム型の利点であるラウンドトリップ伝搬遅延が実質的に短くなるという特徴が発揮されている。これは、タンデム型 Go-back-N A R Q方式のスループットが標準型よりも常に優れていることから明らかである。以上の理由でトレードオフが存在すると思われる。

ところが、プロトコル S においては ACK が返送されるまでの時間が $D/2$ だけ短縮されることから、ラウンドトリップ伝搬遅延 D とノード処理時間 S の関係が次式

$$D > 2(1+S) \quad (6.11)$$

を満たす場合にはトレードオフが存在せず、常にタンデム型が優れていることがわかる。

次に、図 6.6 に平均伝送遅延とノード処理時間 S の関係を示している。ノード処理時間 S が大きくなると平均伝送遅延も大きくなる。また、トラヒック負荷が大きいほどノード処理時間が平均伝送遅延に与える影響が強いことがわかる。

図 6.7 はプロトコル T に対する平均伝送遅延に関して、標準型とタンデム型の優劣の境界を与えるパケットの平均到着率 λ_* を示す。この図では、伝送成功確率 P_d 、 P_u をパラメータとして、横軸はノード処理時間とラウンドトリップ伝搬遅延の比 (S/D) である。縦軸は λ_* をタンデム型のスループット η_{TGBN} ($= \lambda_0$) で正規化した値である。同図において、境界より上側の領域でタンデム型 Go-back-N A R Q方式が有利であることを示している。すなわち、伝送成功確率 P_d 、 P_u が低い場合やノード処理時間 S に比べてラウンドトリップ伝搬遅延 D が長い場合には、ラウンドトリップ伝搬遅延の短縮化効果をもつタンデム型が有利であることがわかる。一方、ノード処理時間 S に比べてラウンドトリップ伝搬遅延 D が短い場合、すなわち、ノード処理時間が長く、伝送速度の速い回線においては、タンデム型 Go-back-N A R Q方式はかえって不利である。このような場合には、中継処理をせずに、直接目的局にパケットを伝送する方が良いことがわかる。

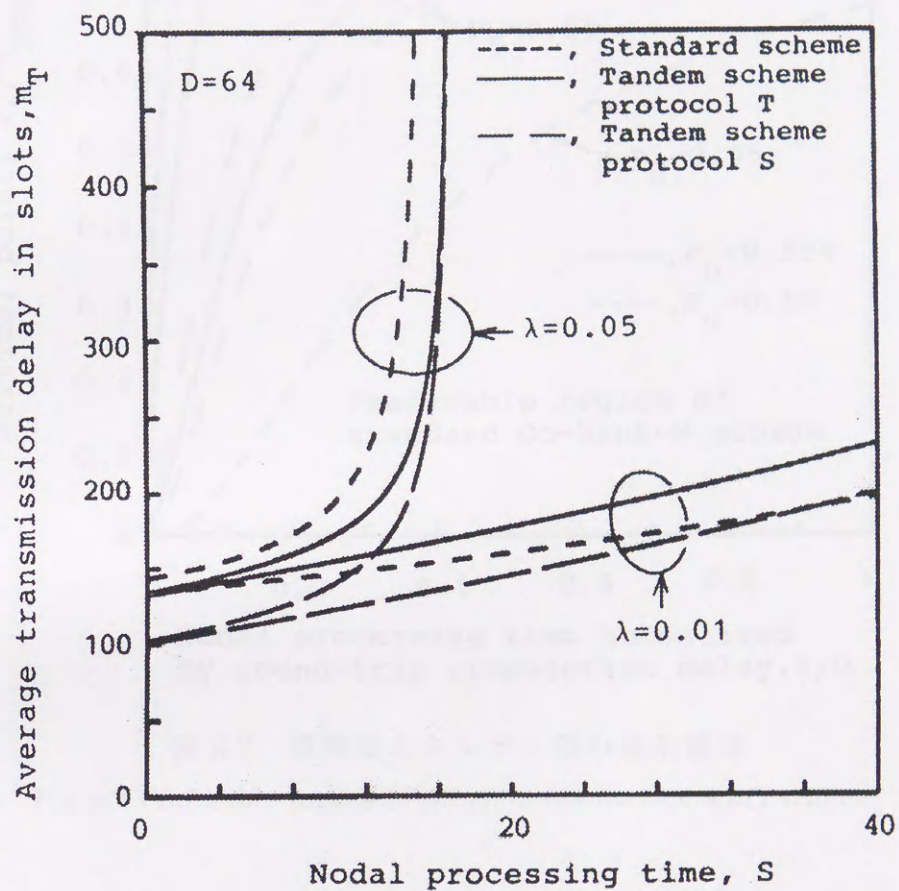


図 6.6 平均伝送遅延に対するノード処理時間の影響 ($P_d=P_u=P_c=0.99$)

Fig.6.6 Average transmission delay vs. nodal processing time
for $P_d=P_u=P_c=0.99$.

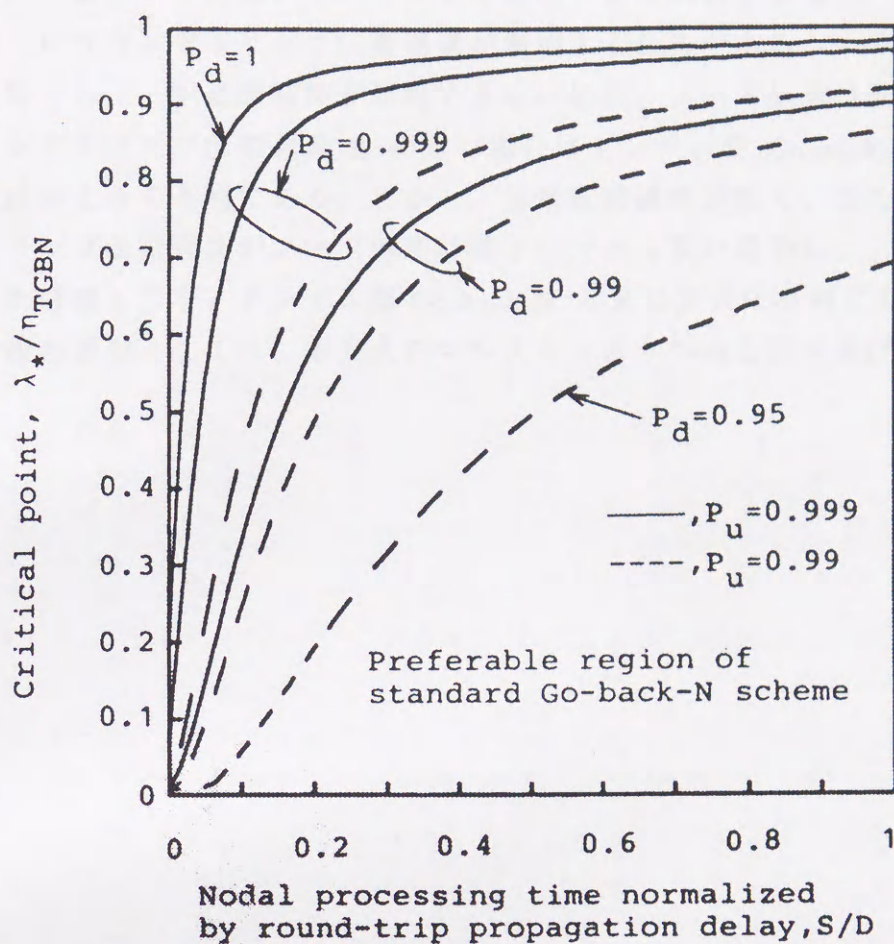


図 6.7 標準型とタンデム型の適用領域

Fig.6.7 Preferable region of standard Go-back-N ARQ scheme.

6.5 結 言

本章では、タンデム型 Go-back-N ARQ 方式において衛星や地上受信局でのノード処理時間を考慮した場合のスループットならびに平均伝送遅延特性について考察した。スループット特性に関しては、ノード処理に時間を要してもタンデム型 Go-back-N ARQ 方式は標準型に比べて常に優れた性能をもっていることが示された。平均伝送遅延特性に関しては、タンデム型 Go-back-N ARQ 方式と標準型 Go-back-N ARQ 方式にトレードオフが存在する。これは、伝送成功確率が高く、トラヒック負荷が小さい

ほど、中継ノードにおいてパケットを処理するために必要なノード処理時間分だけラウンドトリップ伝搬遅延が増加するためである。中継ノードや受信局でのノード処理時間が無視できない場合、ノード処理時間に比べてラウンドトリップ伝搬遅延 D が短い場合はタンデム型 Go-back-N ARQ 方式はかえって不利である。しかし、伝送成功確率が低く、また、ラウンドトリップ伝搬遅延がノード処理時間 S に比べて長い場合は、ノード処理時間を考慮しても、タンデム型 Go-back-N ARQ 方式は有利になる。

今後の課題としては、本方式のマルチキャストへの応用が挙げられる。

第 7 章 結 論

本論文では、衛星通信システムにおける衛星本体にバッファリング機能、誤り検出機能、再送要求機能ならびに再送機能を持たせることにより、性能の向上が期待できるタンデム型 A R Q 方式のトラヒック特性について考察した。タンデム型の A R Q 方式として、基本的な伝送プロトコルである Stop-and-Wait 方式と中低速ネットワークにおいて広く用いられている Go-back-N 方式をとりあげ、スループット特性と平均伝送遅延特性の観点より、その性能について論じた。

第 2 章では、タンデム型 Stop-and-Wait A R Q 方式について、スループットを表す厳密式を導出し、その特性について考察した。その結果、スループットに関しては、衛星がパケットを受信するのに要する時間を考慮しなければならないため、中継再送用バッファサイズが 1 のタンデム型と標準型の間にはトレードオフが存在するが、バッファサイズが 2 以上の場合は標準型よりも常に優れていることが示された。また、スループットはバッファ容量 (≥ 2) の単調増加関数であることから、バッファを無限大用意したスループットの限界値に対するスループットの比を改善率として定義し、バッファサイズの設計指針の一つとして提案した。

第 3 章では、タンデム型 Stop-and-Wait A R Q 方式の平均伝送遅延を表す厳密式を導出し、その特性について考察した。その結果、平均伝送遅延に関しては、衛星がパケットを受信するのに時間 (1 スロット) を要するために、パケットの伝送成功確率が非常に高い場合にはかえってラウンドトリップ伝搬遅延が増加することがわかった。しかし、パケットの伝送成功確率が小さくなるにつれて、また、トラヒック負荷が大きくなるにつれて、複数個の中継再送用バッファを持つタンデム型は、ラウンドトリップ伝搬遅延の実質的減少効果により標準型よりも常に優れており、中継再送用バッファの容量が大きいほど遅延性能が向上することが示された。更に、バッファを無限大用意した平均伝送遅延の限界値に対して遅延改善率を定

義し、スループットと平均伝送遅延性能の両方の観点からのバッファサイズ的设计に対する指針の一つとして提案した。

第4章では、タンデム型 Go-back-N A R Q 方式について、スループットを表す厳密式を導出し、中継再送用バッファがその特性に及ぼす影響について考察した。その結果、スループットに関しては、タンデム型 Go-back-N A R Q 方式は標準型 Go-back-N A R Q 方式よりも常に優れた性能を有することが示された。

第5章では、タンデム型 Go-back-N A R Q 方式の平均伝送遅延を表す厳密式を導出し、その特性について考察した。その結果、平均伝送遅延特性に関しては、タンデム型の特性は標準型に比べておおむね優れた性能をもっていることが示された。しかし、トラヒック負荷が小さい場合には中継ノードにおいてパケットを受信するために必要な1スロット分だけラウンドトリップ伝搬遅延の増加による影響が現れることがわかった。中継ノードでの処理時間が無視できない場合には、このシステムに与える影響は更に大きくなると考えられる。

そこで、第6章では、タンデム型 Go-back-N A R Q 方式において衛星や地上受信局でのノード処理時間を考慮した場合のスループットならびに平均伝送遅延特性について考察した。その結果、スループット特性に関しては、ノード処理に時間を要してもタンデム型 Go-back-N A R Q 方式は標準型に比べて常に優れた性能をもっていることが示された。平均伝送遅延特性に関しては、伝送成功確率が高く、トラヒック負荷が小さいほど、中継ノードにおいてパケットを処理するために必要なノード処理時間分だけラウンドトリップ伝搬遅延が増加するため、タンデム型 Go-back-N A R Q 方式と標準型 Go-back-N A R Q 方式の間にトレードオフが存在することがわかった。また、中継ノードや受信局でのノード処理時間が無視できない場合、ノード処理時間に比べてラウンドトリップ伝搬遅延が短い場合はタンデム型 Go-back-N A R Q 方式はかえって不利であるが、伝送成功確率が低く、また、ラウンドトリップ伝搬遅延がノード処理時間に比べて長い場合は、ノード処理時間を考慮しても、タンデム型 Go-back-N A R Q 方式は有利になることがわかった。

本論文で考察したタンデム型 A R Q 方式の解析は、衛星回線をその適用例としてとりあげたが、地上回線におけるリンク・バイ・リンクの誤り制御にも適用可能である。今後の課題としては、本方式のマルチキャストへの応用が挙げられる。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、終始ご指導を賜り、また、有益な議論、およびご助言を頂きました佐賀大学工学部林田行雄教授、同大学工学部（故）吉田良教教授に心より感謝致します。本論文の作成に関し、詳細なご検討、貴重なご教示を頂きました佐賀大学工学部近藤弘樹教授、同大学工学部渡邊義明教授、同大学工学部新井康平教授に深く感謝致します。同じく本論文の作成に関し、貴重なご教示を頂きました同大学工学部林敏浩助教授に深く感謝致します。

本研究を通じて、ご議論ご助言頂きました佐賀大学工学部知能情報システム学科前田明子助手、同大学工学部電気電子工学科福田隆良技官に深く感謝致します。

大学院生であった高橋寛氏、江頭孝氏には、ご協力頂きました。ここに記して感謝致します。

参考文献

- [1] J. P. Hubaux, D. Nagel, and B. Kiebertz, "Provision of communication services over hybrid networks," *IEEE Commun., Mag.*, Vol. 37, 7, pp.36-37, July 1999.
- [2] I. F. Akyildiz, and S. -H. Jeong, "Satellite ATM networks: A survey," *IEEE Commun., Mag.*, Vol. 35, 7, pp.30-43, July 1997.
- [3] 川島幸之助, 町原文明, 高橋敬隆, 斎藤洋, “通信トラヒック理論の基礎とマルチメディア通信網,” 電子情報通信学会, 1995.
- [4] M. Gerla and L. Kleinrock, "Flow control: A comparative survey," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. COM-28, 4, pp.553-574, Apr. 1980.
- [5] L. Kleinrock and P. Kermani, "Static flow control in store-and-forward computer networks," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. COM-28, 2, pp.271-279, Feb. 1980.
- [6] J. -K. Choi and C. K. Un, "On acknowledgment schemes of sliding window flow control," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 37, 11, pp.1184-1191, Nov. 1989.
- [7] H. O. Burton and D. D. Sullivan, "Errors and error control," *Proc. IEEE*, vol. 60, pp.1293-1301, Nov. 1972.
- [8] A. S. Tanenbaum, *Computer Networks*. Prentice-Hall, Inc., 1982.
- [9] L. Kleinrock, *QUEUEING SYSTEMS Volume 1: Theory*. Wiley-Interscience, 1975.

- [10] 秋丸春夫, ロバート B クーパー, “通信トラヒック工学,” オーム社, 1985.
- [11] G. Fayolle, E. Gelenbe, and G Pujolle, "An analytic evaluation of the performance of the "Send and Wait" protocol," IEEE Trans. Commun., Vol. COM-26, 3, pp.313-319, Mar. 1978.
- [12] R. Fantacci, "Performance evaluation of some efficient stop-and-wait techniques," IEEE Trans. Commun., Technol., Vol. 40, 11, pp.1665-1669, Nov. 1992.
- [13] M. Moeneclaey, H. Bruneel, I. Bruylant and D. Y. Chung, "Throughput optimization for a generalized stop-and-wait ARQ scheme," IEEE Trans. Commun., Technol., Vol. COM-34, 2, pp.205-207, Feb. 1986.
- [14] A. R. K. Sastry, "Improving automatic repeat-request (ARQ) performance on satellite channels under high error rate conditions," IEEE Trans. Commun., Vol. COM-23, 4, pp.436-439, April 1975.
- [15] J. M. Morris, "On another go-back- N ARQ technique for high error rate conditions," IEEE Trans. Commun., Vol. COM-26, 1, pp.187-189, Jan. 1978.
- [16] S. Lin and P. S. Yu, "An effective error control scheme for satellite communications," IEEE Trans. Commun., Vol. COM-28, 3, pp.395-401, Mar. 1980.
- [17] G. Benelli, "Go-back- N ARQ scheme with buffer at the receiver," Proc. IEE, Part F, Vol. 133, pp.271-276, June 1986.
- [18] Y. -D. Yao, "An effective go-back- N ARQ scheme for variable-error-rate channels," IEEE Trans. Commun., Vol. 43, 1, pp.20-23, Jan. 1995.
- [19] A. Annamalai, V. K. Bhargava, and W. -S. Lu, "On adaptive go-back- N ARQ protocol for variable-error rate channels," IEEE Trans. Commun., Vol. 46, 11, pp.1405-1408, Nov. 1998.

- [20] P. S. Yu and S. Lin, "An efficient selective-repeat ARQ scheme for satellite channels and its throughput analysis," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. COM-29, 3, pp.353-363, Mar. 1980.
- [21] M. J. Miller and S. Lin, "The analysis of some selective-repeat ARQ schemes with finite receiver buffer," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. COM-29, 9, pp.1307-1315, Sept. 1981.
- [22] M. E. Anagnostou and E. N. Protonotarios, "Performance analysis of the selective repeat ARQ protocol," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. COM-34, 2, pp.127-135, Feb. 1986.
- [23] N. Shacham and D. Towsley, "Resequencing delay and buffer occupancy in selective repeat ARQ with multiple receivers," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 39, 6, pp.928-937, June 1991.
- [24] G. Benelli, "A selective ARQ protocol with a finite-length buffer," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 41, 7, pp.1102-1111, July 1993.
- [25] R. Fantacci, "Performance evaluation of a finite buffer generalized selective repeat ARQ scheme for satellite communications," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 45, 2, pp.140-143, Feb. 1997.
- [26] J. J. Metzner, "Improvements in block-retransmission schemes," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. COM-27, 2, pp.524-532, Feb. 1979.
- [27] S. Lin and P. S. Yu, "A hybrid ARQ scheme with parity retransmission for error control of satellite channels," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. COM-30, 7, pp.1701-1719, July 1982.
- [28] S. Kallel and D. Haccoun, "Sequential decoding with ARQ and code combining: A robust hybrid FEC/ARQ system," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 36, 7, pp.773-780, July 1988.
- [29] A. Shiozaki, K. Okuno, K. Suzuki, and T. Segawa, "A hybrid ARQ scheme with adaptive forward error correction for satellite communications," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 39, 4, pp.482-484, Apr. 1991.

- [30] M. A. Kousa and M. Rahman, "An adaptive error control system using hybrid ARQ schemes," IEEE Trans. Commun., Vol. 39, 7, pp.1049-1057, July 1991.
- [31] S. Kallel, "Analysis of a type II hybrid ARQ scheme with code combining," IEEE Trans. Commun., Vol. 38, 8, pp.1133-1137, Aug. 1990.
- [32] D. Towsley and J. K. Wolf, "On the statistical analysis of queue lengths and waiting times for statistical multiplexers with ARQ retransmission schemes," IEEE Trans. Commun., COM-27, 4, pp.693-702, Apr. 1979.
- [33] H. Bruneel and M. Moeneclaey, "On the throughput performance of some continuous ARQ strategies with repeated transmissions," IEEE Trans. Commun., COM-34, 3, pp.244-249, Mar. 1986.
- [34] 林田行雄, 藤井俊二, 手塚慶一, "パケットのコピー伝送を行う連続型 A R Q 方式の伝送遅延特性," 信学論 (B), J70-B, 10, pp.1111-1117, Oct. 1987.
- [35] W. W. Wu, *Elements of Digital Satellite Communication:vol.1*. Computer Science Press, 1984.
- [36] K. Mase, T. Takenaka, H. Yamamoto, and M. Shinohara, "Go-Back-N ARQ schemes for point-to-multipoint satellite communications," IEEE Trans. Commun., COM-31, 4, pp.583-589, Apr. 1983.
- [37] 杉町信行, 林田行雄, 吉田良教, "タンデム型 Stop-and-Wait ARQ 方式におけるバッファリングの効果," 信学論 (B-I) Vol.J72-B-I, No.5, pp.429-437, May 1989.
- [38] 杉町信行, 林田行雄, 吉田良教, "タンデム型 Stop-and-Wait ARQ 方式の伝送遅延特性," 信学論 (B-I) Vol.J72-B-I, No.12, pp.1159-1164, Dec. 1989.
- [39] 林田行雄, 杉町信行, 吉田良教, "タンデム型 Go-back-N ARQ 方式のスループット解析," 信学論 (B-I) Vol.J72-B-I, No.3, pp.219-225, Mar. 1989.

- [40] 林田行雄, 杉町信行, 吉田良教, “タンデム型 Go-back-N ARQ 方式の伝送遅延特性,” 信学論 (B-I) Vol.J72-B-I, No.6, pp.486-491, June 1989.
- [41] 林田行雄, 杉町信行, 高橋寛, 吉田良教, “ノード処理時間を考慮したタンデム型 Go-back-N ARQ 方式のトラヒック特性,” 信学論 (B-I) Vol.J72-B-I, No.10, pp.816-822, Oct. 1989.
- [42] 小和田正, “確率過程とその応用,” 実教出版, 1983.
- [43] A. O. Allen, *Probability, Statistics, and Queueing Theory with Computer Science Applications Second Edition*. Academic Press, Inc., 1990.
- [44] 今井秀樹, “情報理論,” 昭晃堂, 1984.
- [45] H. M. ワグナー (著), 森村英典, 伊理正夫 (監訳), 平本巖, 反町迪子, 前島信 (共訳), “オペレーションズ・リサーチ入門6=待ち行列,” 培風館, 1986.
- [46] U. Black, *DATA LINK PROTOCOLS*. Printice-Hall, Inc., 1993.

発表論文リスト

(参考論文)

- [1] 杉町信行, 林田行雄, 吉田良教, “タンデム型 Stop-and-Wait ARQ 方式におけるバッファリングの効果,” 電子情報通信学会論文誌 B-I, Vol.J72-B-I, No.5, pp.429-437, May 1989.
- [2] 杉町信行, 林田行雄, 吉田良教, “タンデム型 Stop-and-Wait ARQ 方式の伝送遅延特性,” 電子情報通信学会論文誌 B-I, Vol.J72-B-I, No.12, pp.1159-1164, Dec. 1989.
- [3] 林田行雄, 杉町信行, 吉田良教, “タンデム型 Go-back-N ARQ 方式のスループット解析,” 電子情報通信学会論文誌 B-I, Vol.J72-B-I, No.3, pp.219-225, Mar. 1989.
- [4] 林田行雄, 杉町信行, 吉田良教, “タンデム型 Go-back-N ARQ 方式の伝送遅延特性,” 電子情報通信学会論文誌 B-I, Vol.J72-B-I, No.6, pp.486-491, June 1989.
- [5] 林田行雄, 杉町信行, 高橋寛, 吉田良教, “ノード処理時間を考慮したタンデム型 Go-back-N ARQ 方式のトラヒック特性,” 電子情報通信学会論文誌 B-I, Vol.J72-B-I, No.10, pp.816-822, Oct. 1989.
- [6] Nobuyuki Sugimachi, Yukuo Hayashida, Takashi Egashira and Yoshinori Yoshida, “Throughput of Tandem Stop-and-Wait Schemes with Copy-transmissions,” Proc. of the 1989 Singapore International on Networks, pp.433-438, July 1989.

- [7] Yukuo Hayashida, Nobuyuki Sugimachi, Hiroshi Takahashi and Yoshinori Yoshida, "Throughput of Tandem Go-Back-N scheme with Nodal Processing Time," Proc. of the 1989 Singapore International on Networks, pp.259-264, July 1989.

博 士 学 位 論 文

学 位 の 種 類 博 士 (工 学)

学位授与大学 佐 賀 大 学

学 位 記 番 号 乙第 26 号

学位授与の日付 2000 年 3 月 23 日

